

Análisis y diseño de robot multifuncional SCARA con enfoque pedagógico en robótica

CÓDIGO DE PROYECTO: PG-17-1-04



JULIÁN ESTEBAN HERRERA BENAVIDES

CÓDIGO: 1310646

IDENTIFICACIÓN: C.C. 1.121.923.074

DANIEL EDUARDO ESPITIA CORREDOR

CÓDIGO: 1310978

IDENTIFICACIÓN: C.C. 1.032.476.420

UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

BOGOTÁ, D.C.

2017

Análisis y diseño de robot multifuncional SCARA con enfoque pedagógico en robótica

JULIÁN ESTEBAN HERRERA BENAVIDES

CÓDIGO: 1310646

IDENTIFICACIÓN: C.C. 1.121.923.074

DANIEL EDUARDO ESPITIA CORREDOR

CÓDIGO: 1310978

IDENTIFICACIÓN: C.C. 1.032.476.420

**PROYECTO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO MECATRÓNICO DE LA
UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA**

DIRECTOR:

M.SC. David Herrera Alfonso

M.Sc en automatización industrial

Ing. en mecatrónica

CODIRECTOR:

Ing. Néstor Fernando Penagos

Ing. en electrónica

UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

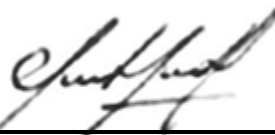
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

BOGOTÁ, D.C.

2017

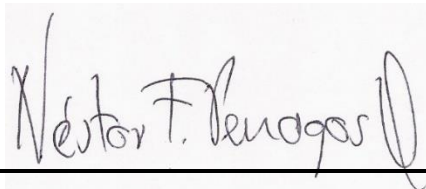
NOTA DE ACEPTACIÓN

Una vez realizada la revisión metodológica y técnica del documento final de proyecto de grado, doy constancia de que el (los) estudiante (s) ha cumplido a cabalidad con los objetivos propuestos, cumple a cabalidad con los Lineamientos de Opción de Grado vigentes del programa de Ingeniería Mecatrónica y con las leyes de derechos de autor de la República de Colombia, por tanto, se encuentra(n) preparado(s) para la defensa del mismo ante un jurado evaluador que considere idóneo el Comité de Investigaciones del Programa de Ingeniería Mecatrónica de la Universidad Piloto de Colombia.



David Herrera Alfonso

Director del Proyecto



Néstor Fernando Penagos

Codirector del Proyecto

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
NOTA DE ACEPTACIÓN	3
LISTA DE TABLAS	6
LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE ANEXOS	11
INTRODUCCIÓN.....	12
RESUMEN	13
ABSTRACT	14
1. GENERALIDADES.....	15
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	15
1.1.1 <i>Antecedentes del problema</i>	15
1.1.2 <i>Descripción del problema</i>	15
1.1.3 <i>Formulación del problema</i>	16
1.2 JUSTIFICACIÓN	16
1.3 OBJETIVOS	17
1.3.1 <i>Objetivo general</i>	17
1.3.2 <i>Objetivos específicos</i>	17
1.4 DELIMITACIÓN DEL PROYECTO	17
1.4.1 <i>Alcances y limitaciones</i>	17
1.4.2 <i>Línea de investigación del programa</i>	18
1.5 MARCO REFERENCIAL.....	18
1.5.1 <i>Estado del arte</i>	18
1.6 MARCO METODOLÓGICO	20
2. DISEÑO MECÁNICO.....	22
2.1 MATERIAL IMPLEMENTADO EN EL MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA.....	22
2.2 DISEÑO DEL GRIPPER (EFECTOR FINAL)	27
2.3 DIMENSIONAMIENTO DE LOS ESLABONES ROTACIONALES DEL ROBOT SCARA (3-DOF)	46
2.4 ESLABONES ROTACIONALES	49
2.5 ESLABÓN PRISMÁTICO Y BASE DEL ROBOT.	67
3. DISEÑO E IMPLEMENTACION DE CIRCUITOS IMPRESOS Y ETAPAS DE POTENCIA	79
3.1 RESUMEN DEL CAPÍTULO.....	79
3.2 FUENTES LINEALES	79
3.2.1 <i>Fuente lineal controlada por corriente</i>	79
3.2.2 <i>Fuente lineal controlada por voltaje</i>	80
3.2.3 <i>Fuente lineal controlada por amplificador operacional</i>	81
3.2.4 <i>Fuente lineal controlada por señal PWM</i>	84
3.2.4.1 <i>Interruptor cerrado</i>	86
3.2.4.2 <i>Interruptor abierto</i>	87
3.2.4.3 <i>Comprobación del funcionamiento</i>	88
3.2.5 <i>Fuente lineal controlada por regulador</i>	89
3.3 DISEÑO DEL CIRCUITO DE CONTROL.....	91
3.3.1 <i>Interfaz de comunicación</i>	92
3.3.2 <i>Control de motores</i>	94
3.4 DISEÑO DEL DRIVER.....	95
3.4.1 <i>Selección del microcontrolador</i>	101
3.4.2 <i>Selección de la fuente lineal</i>	104
4. OBJETO VIRTUAL DE APRENDIZAJE	106

4.1	MODELO DEL ENTORNO OPERATIVO DEL ROBOT	108
4.2	CINEMÁTICA DIRECTA.....	110
4.3	CINEMÁTICA INVERSA	112
4.4	SIMULAR ROBOT	113
4.5	ROBOT ANTROPOMÓRFICO (RRR).....	121
4.6	ROBOT SCARA (RRP).....	125
4.7	ROBOT SCARA (PRR).....	128
4.8	ROBOT CARTESIANO (PPP)	130
5.	DISEÑO DEL ALGORITMO DE PLANEACIÓN DE TRAYECTORIA PARA EL ROBOT SCARA	132
5.1	RESUMEN DEL CAPÍTULO.....	132
5.2	ALGORITMO FLOOD FILL	133
5.3	REPRESENTACIÓN DISCRETA DEL ENTORNO OPERATIVO DE UN ROBOT FIJO	137
5.4	FLOOD FILL MODIFICADO APLICADO AL ROBOT SCARA	142
6.	RESULTADOS Y PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO	149
7.	CONCLUSIONES	159
8.	RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS	160
9.	REFERENCIAS	161
ANEXO 1. PLANOS ELÉCTRICOS		164
ANEXO 2. PLANOS MECÁNICOS		167

LISTA DE TABLAS

	Pág.
<i>Tabla 1 peso y medida mínima de sujeción de tres elementos.....</i>	<i>27</i>
<i>Tabla 2 servomotores comerciales.....</i>	<i>33</i>
<i>Tabla 3 Tensión inicial de correa Unidad en N (20)</i>	<i>77</i>
<i>Tabla 4. Elementos implementados en la interfaz de comunicación.....</i>	<i>92</i>
<i>Tabla 5. Elementos implementados en el control de los motores</i>	<i>95</i>
<i>Tabla 6. Tabla de verdad del puente H</i>	<i>98</i>
<i>Tabla 7. Propiedades mínimas para un correcto funcionamiento del driver.....</i>	<i>99</i>
<i>Tabla 8. Datos del microcontrolador seleccionado. (25)</i>	<i>101</i>
<i>Tabla 9 Ejemplo de la información que se almacena para la trayectoria.....</i>	<i>114</i>

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
<i>Ilustración 1 Gráfica de esfuerzo deformación ingenieril para PLA natural (14).....</i>	23
<i>Ilustración 2 Gráfica de esfuerzo deformación ingenieril para PLA natural (15).....</i>	24
<i>Ilustración 3 Gráfica S-N para dos tipos de material PLA (16).....</i>	25
<i>Ilustración 4 Gráfica S-N para un material con articulación de rodilla (aceros) (12).....</i>	26
<i>Ilustración 5 diagrama S-N aproximado para el material PLA.</i>	27
<i>Ilustración 6 Primer boceto del gripper.....</i>	28
<i>Ilustración 7 eslabones 2,3,4 y 5 en una diferente posición angular.</i>	29
<i>Ilustración 8 fuerzas en las pinzas del gripper.</i>	30
<i>Ilustración 9 Diagrama de cuerpo libre de los eslabones 2 y 4.</i>	32
<i>Ilustración 10 Datos para el coeficiente de fricción seca en algunos materiales (17)</i>	34
<i>Ilustración 11 segundo boceto para el gripper.</i>	36
<i>Ilustración 12 Estado de esfuerzos en los eslabones 1 y 6.</i>	37
<i>Ilustración 13 diagrama de Goodman modificado para los eslabones 1y 6 del gripper.....</i>	39
<i>Ilustración 14 Diagrama de Goodman modificado con la línea de falla más cercana.</i>	39
<i>Ilustración 15. Resultados del programa respecto al factor de seguridad.</i>	40
<i>Ilustración 16 situación de esfuerzos para eslabón 3.</i>	41
<i>Ilustración 17 diagrama de Goodman modificado para eslabón 3.....</i>	41
<i>Ilustración 18. Factores geométricos J. (12).....</i>	43
<i>Ilustración 19 diagrama de Goodman modificado para el engranaje.....</i>	45
<i>Ilustración 20 CAD del gripper</i>	46
<i>Ilustración 21 Estructura básica del robot Scara de 3-DOF.....</i>	46
<i>Ilustración 22 Espacio de trabajo del robot Scara en los ejes “x” y “y”.</i>	47
<i>Ilustración 23 eslabón rotacional 4 con gripper.....</i>	48
<i>Ilustración 24 Estado de esfuerzos en el eslabón 4.....</i>	49
<i>Ilustración 25 Diagrama de Goodman para el eslabón de la ilustración 24.</i>	50
<i>Ilustración 26 Diagrama de cuerpo libre para carga máxima en eslabón 4.</i>	51
<i>Ilustración 27 Diagrama de cuerpo libre para carga mínima en eslabón 4.</i>	51
<i>Ilustración 28 Diagrama S-N para acero.....</i>	53
<i>Ilustración 29 Estado de esfuerzos en el tornillo cuando soporta toda la carga.</i>	54
<i>Ilustración 30 Estado de esfuerzos en el tornillo cuando soporta sólo el eslabón 4.</i>	54
<i>Ilustración 31 Diagrama de Goodman para los tornillos que sostienen al eslabón 4.....</i>	55
<i>Ilustración 32 Diagrama de cuerpo libre para carga máxima en el eje</i>	56
<i>Ilustración 33 Diagrama de cuerpo libre para carga mínima en el eje.....</i>	56
<i>Ilustración 34 Estado de esfuerzos máximo para el eje.</i>	57
<i>Ilustración 35 Estado de esfuerzos mínimo para el eje.....</i>	57
<i>Ilustración 36 Diagrama de Goodman para eje.....</i>	58
<i>Ilustración 37 soporte del eje mediante un rodamiento axial</i>	59
<i>Ilustración 38 CAD de Eslabón 3.....</i>	60
<i>Ilustración 39 Carga máxima sobre el eslabón 3</i>	60
<i>Ilustración 40 Carga mínima sobre el eslabón 3.</i>	61
<i>Ilustración 41 Estado de esfuerzos máximo en el eslabón 3.....</i>	62

<i>Ilustración 42 Estado de esfuerzos mínimo en el eslabón 3.....</i>	<i>62</i>
<i>Ilustración 43 Diagrama de Goodman para eslabón 3.</i>	<i>63</i>
<i>Ilustración 44 Carga máxima sobre eje que soporta al eslabón 3.</i>	<i>64</i>
<i>Ilustración 45 Carga mínima sobre el eje que soporta al eslabón 3.</i>	<i>64</i>
<i>Ilustración 46 Estado de esfuerzos máximo sobre eje que soporta al eslabón 3.....</i>	<i>65</i>
<i>Ilustración 47 Estado de esfuerzos mínimo sobre eje que soporta al eslabón 3.....</i>	<i>65</i>
<i>Ilustración 48 Diagrama de Goodman para eje que soporta al eslabón 3</i>	<i>66</i>
<i>Ilustración 49 Ensamble del gripper con los dos eslabones rotacionales.</i>	<i>66</i>
<i>Ilustración 50 Base para motor acoplada en el eslabón 3.</i>	<i>67</i>
<i>Ilustración 51 Eslabón prismático.</i>	<i>68</i>
<i>Ilustración 52 Carga máximo sobre eslabón 2.....</i>	<i>68</i>
<i>Ilustración 53 Carga mínima sobre eslabón 2.....</i>	<i>69</i>
<i>Ilustración 54 mayor estado de esfuerzos en pieza más crítica del eslabón primático.</i>	<i>70</i>
<i>Ilustración 55 Menor estado de esfuerzos en la pieza más crítica del eslabón prismático.</i>	<i>70</i>
<i>Ilustración 56 Diagrama de Goodman para en la pieza más crítica del eslabón prismático.....</i>	<i>71</i>
<i>Ilustración 57 Mayor estado de esfuerzos en varilla que soporta al eslabón prismático.</i>	<i>71</i>
<i>Ilustración 58 Menor estado de esfuerzos en varilla que soporta al eslabón prismático.</i>	<i>72</i>
<i>Ilustración 59 Diagrama de Goodman para varilla que soporta al eslabón prismático.</i>	<i>72</i>
<i>Ilustración 60 Mecanismo para el movimiento en el eje z.....</i>	<i>73</i>
<i>Ilustración 61 Sistema de transmisión por banda de sincronización</i>	<i>74</i>
<i>Ilustración 62 Gráficas para selección del perfil del diente para correas sincrónicas (20)</i>	<i>76</i>
<i>Ilustración 63 Diseño final de la estructura.</i>	<i>78</i>
<i>Ilustración 64. Fuente lineal controlada por corriente.....</i>	<i>80</i>
<i>Ilustración 65. Fuente lineal controlada por voltaje</i>	<i>80</i>
<i>Ilustración 66. Fuente lineal controlada por amplificador.....</i>	<i>81</i>
<i>Ilustración 67. Fuente lineal controlada por amplificador con etapa de potencia robusta.....</i>	<i>82</i>
<i>Ilustración 68. Fuente lineal por amplificador con etapa de potencia robusta.</i>	<i>83</i>
<i>Ilustración 69. Fuente lineal controlada por PWM.</i>	<i>84</i>
<i>Ilustración 70. Circuito de carga para el capacitor y su equivalente.</i>	<i>85</i>
<i>Ilustración 71. Señal de pulso (21)</i>	<i>85</i>
<i>Ilustración 72. Circuito de la ilustración 7 analizado con el interruptor cerrado.....</i>	<i>86</i>
<i>Ilustración 73. Circuito de la ilustración 7 analizado con el interruptor abierto.....</i>	<i>87</i>
<i>Ilustración 74. Voltaje en el capacitor.....</i>	<i>88</i>
<i>Ilustración 75. Funcionamiento de fuente lineal controlada por PWM.....</i>	<i>89</i>
<i>Ilustración 76. Regulador de tensión LM317</i>	<i>90</i>
<i>Ilustración 77. Fuente lineal controlada por regulador LM317.</i>	<i>90</i>
<i>Ilustración 78. Fuente lineal controlada por regulador LM317.</i>	<i>91</i>
<i>Ilustración 79 Conexión más implementada en la LCD de caracteres. (6 terminales digitales).</i>	<i>93</i>
<i>Ilustración 80 Conexión Pull Down para detectar pulsador.....</i>	<i>93</i>
<i>Ilustración 81 Transistor MOSFET de enriquecimiento implementado como conmutador.</i>	<i>94</i>
<i>Ilustración 82. Diseño inicial para el puente H.....</i>	<i>96</i>
<i>Ilustración 83. Compuerta NOT agregada al puente H.....</i>	<i>97</i>
<i>Ilustración 84. Configuración final del puente H.....</i>	<i>97</i>
<i>Ilustración 85. Diseño final para el driver de motores.</i>	<i>98</i>
<i>Ilustración 86 Fuente lineal implementada.....</i>	<i>101</i>
<i>Ilustración 87. Microcontrolador ATMEGA 382P (25).....</i>	<i>102</i>

<i>Ilustración 88. Circuito de control. a) circuito para la interfaz de comunicación.....</i>	<i>103</i>
<i>Ilustración 89. Fuentes lineales escogidas para el circuito de control</i>	<i>104</i>
<i>Ilustración 90 Tarjeta de control.....</i>	<i>105</i>
<i>Ilustración 91 Fuente lineal.....</i>	<i>105</i>
<i>Ilustración 92. Driver.....</i>	<i>105</i>
<i>Ilustración 93 Diagrama de actividad del software.</i>	<i>107</i>
<i>Ilustración 94 Selección del área de interés.</i>	<i>107</i>
<i>Ilustración 95. Explicación del concepto Movimiento Rígido.....</i>	<i>109</i>
<i>Ilustración 96 Simulación de la rotación de un objeto sobre el eje x (ángulo=0).....</i>	<i>109</i>
<i>Ilustración 97 Simulación de la rotación de un objeto sobre el eje x (ángulo=-90°).</i>	<i>110</i>
<i>Ilustración 98 Representación de un robot Antropomórfico mediante líneas</i>	<i>112</i>
<i>Ilustración 99 Representación de un robot antropomórfico implementando la forma de los eslabones.</i>	<i>112</i>
<i>Ilustración 100 Simulación de robot Scara (PRR).....</i>	<i>113</i>
<i>Ilustración 101 Secciones de la interfaz.</i>	<i>114</i>
<i>Ilustración 102 Robot Scara (RRP)</i>	<i>115</i>
<i>Ilustración 103 Robot Scara (PRR)</i>	<i>116</i>
<i>Ilustración 104 Robot Antropomórfico (RRR).....</i>	<i>116</i>
<i>Ilustración 105 Robot Cartesiano (PPP)</i>	<i>117</i>
<i>Ilustración 106 Robot Scara (RRP)</i>	<i>117</i>
<i>Ilustración 107 Robot Scara (PRR)</i>	<i>118</i>
<i>Ilustración 108 Robot Antropomórfico (RRR).....</i>	<i>118</i>
<i>Ilustración 109 Robot Cartesiano (PPP)</i>	<i>118</i>
<i>Ilustración 110 Conexión de placa Arduino uno al puerto USB.....</i>	<i>119</i>
<i>Ilustración 111 Conexión exitosa entre la placa y el software.....</i>	<i>120</i>
<i>Ilustración 112 Interfaz editora.....</i>	<i>121</i>
<i>Ilustración 113 Imagen de apoyo para entender los datos requeridos.</i>	<i>121</i>
<i>Ilustración 114 Ejes coordenados implementados en el robot Antropomórfico.....</i>	<i>122</i>
<i>Ilustración 115 Configuración del robot Scara con 3-DOF.</i>	<i>126</i>
<i>Ilustración 116Robot Scara (PRR)</i>	<i>128</i>
<i>Ilustración 117 Robot Cartesiano(PPP)</i>	<i>131</i>
<i>Ilustración 118. Representación matricial del entorno (27).....</i>	<i>133</i>
<i>Ilustración 119. Llenado de la representación matricial del entorno (27).....</i>	<i>133</i>
<i>Ilustración 120. Trayectoria solucionada del Flood Fill (27).....</i>	<i>134</i>
<i>Ilustración 121. Obtención del mundo continuo.....</i>	<i>135</i>
<i>Ilustración 122. Representación discreta del mundo continuo</i>	<i>135</i>
<i>Ilustración 123. Eliminación de los extremos del robot en la matriz (Excepto un valor usado de referencia).....</i>	<i>135</i>
<i>Ilustración 124. Llegada del robot al punto deseado.....</i>	<i>136</i>
<i>Ilustración 125. Solución a la trayectoria del robot móvil</i>	<i>136</i>
<i>Ilustración 126. Trayectoria tridimensional del algoritmo.....</i>	<i>137</i>
<i>Ilustración 127. Robot Scara (RRP) y sus sistemas coordenados</i>	<i>138</i>
<i>Ilustración 128. Entorno operativo del robot.</i>	<i>139</i>
<i>Ilustración 129.Creación nuevo sistema coordenado “e”.....</i>	<i>140</i>
<i>Ilustración 130. Relación entre el sistema “e” y la matriz que representa el espacio discretizado</i>	<i>140</i>
<i>Ilustración 131. Entorno operativo del robot discretizado.....</i>	<i>142</i>

<i>Ilustración 132. Matriz con solución de llegada 1.....</i>	<i>143</i>
<i>Ilustración 133. Matriz con solución de llegada 2.....</i>	<i>143</i>
<i>Ilustración 134. Segundo movimiento del robot en la situación de la ilustración 122.</i>	<i>144</i>
<i>Ilustración 135. Planeación de trayectoria para el robot Scara.....</i>	<i>148</i>
<i>Ilustración 136. Planeación de trayectoria</i>	<i>148</i>
<i>Ilustración 137 CAD del gripper</i>	<i>149</i>
<i>Ilustración 138 Ensamble físico del gripper.</i>	<i>149</i>
<i>Ilustración 139 Medición de la fuerza en las pinzas del gripper mediante una gramera.</i>	<i>150</i>
<i>Ilustración 140 Gripper sosteniendo celular de 228g.....</i>	<i>151</i>
<i>Ilustración 141 Gripper sosteniendo libreta de 248g.....</i>	<i>151</i>
<i>Ilustración 142 Robot Scara en físico.</i>	<i>152</i>
<i>Ilustración 143 Elementos cuya masa en conjunto es de aproximadamente de 1kg.</i>	<i>153</i>
<i>Ilustración 144 Carga de 1kg aplicada en el extremo del eslabón.....</i>	<i>153</i>
<i>Ilustración 145 Driver para control de motores paso a paso.</i>	<i>154</i>
<i>Ilustración 146 Circuito de control.</i>	<i>154</i>
<i>Ilustración 147 manipulación de objeto mediante el software.</i>	<i>155</i>
<i>Ilustración 148 Manipulación de objeto mediante el software.</i>	<i>155</i>
<i>Ilustración 149 Manipulación de objeto mediante el software.</i>	<i>156</i>
<i>Ilustración 150 Prueba de movimiento del robot con un marcado.....</i>	<i>156</i>
<i>Ilustración 151 Prueba de movimiento con un marcador.....</i>	<i>157</i>
<i>Ilustración 152 planeación de trayectoria para el robot.</i>	<i>157</i>
<i>Ilustración 153 Planeación de trayectoria para el robot.</i>	<i>158</i>

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. Planos eléctricos

ANEXO B. Planos mecánicos

INTRODUCCIÓN

La robótica como área de estudio, es una herramienta fundamental con la cual los ingenieros Mecatrónicos explican el comportamiento de múltiples máquinas que hoy en día se encuentran en la industria. Al ser una base en la formación del ingeniero, se diseña una plataforma educativa que comprende la integración tanto de un software como de un hardware. Esta tiene la capacidad de simular y transmitir los principales conceptos de la robótica, además de permitir el control de los principales robots fijos (Antropomórfico, Scara, Cartesiano). Además de esto, se analiza la construcción de un robot SCARA que sirva como herramienta adicional para prácticas en el laboratorio. Con el cual se permita simular ciclos de trabajo preprogramados por el estudiante, y así de esta manera se le incentive el interés por esta área.

Para implementar este sistema, se utilizan conceptos de robótica, control, electrónica, mecánica y programación con los que se buscan sustentar el funcionamiento de cada parte que conforma el proyecto.

Tanto el software como el prototipo se dejarán al semillero de “robótica y biomecatrónica” para contribuirle en su labor de enseñanza.

RESUMEN

Este documento presenta el diseño de un robot Scara de 3 grados de libertad el cual se ha enfocado en el área de la educación para que, mediante un software, sea capaz de transmitir los conceptos básicos de la robótica. Para el desarrollo del prototipo se realizan análisis mecánicos, electrónicos e informáticos que sustentan el diseño realizado. En la sección mecánica se estudia cada elemento de la estructura de forma estática y dinámica para lograr argumentar, mediante teorías de falla, las dimensiones y materiales escogidos. Adicionalmente, en el análisis electrónico, se encuentra el diseño de los circuitos necesarios para el correcto funcionamiento del robot, dicho diseño cuenta con etapas de potencia que permiten controlar los motores paso a paso y reductores más usuales para la línea estudiantil, con el fin de facilitar la implementación del robot. Por otro lado, para el movimiento de este tipo de mecanismos se propone un algoritmo que logra generar la planeación de trayectoria de cualquier robot fijo, teniendo en cuenta la presencia de obstáculos en el entorno operativo del mismo. Finalmente, se presenta el desarrollo de un programa pedagógico que permite a los estudiantes interactuar con las matrices de transformación homogénea y los robots Scara, Antropomórfico y Cartesiano. Además de esto el software es el encargado de crear la interfaz de comunicación entre el mecanismo y el usuario, por lo que mediante éste se logra ejecutar rutinas que le permiten realizar algún trabajo al robot. Los resultados indican que el software es una herramienta totalmente funcional con la cual se puede trabajar los conceptos más básicos de la robótica e implementarlos en físico con el Scara diseñado, o con los que ofrece el programa. Además de esto se evidencia que es posible crear rutinas que permiten al robot realizar la manipulación de objetos implementando el algoritmo de planeación de trayectoria

ABSTRACT

This paper presents the design of Scara robot with three degrees of freedom, focused on educational purposes, aimed to transmit basic concepts of robotics through a software program. For developing the prototype, a series of mechanical, electronic and computing analyses were carried out for supporting the design proposed. In the mechanical section, each element of the structure was studied statically and dynamically to justify, through failure criteria, the choice of dimensions and materials. Additionally, a series of equations are presented to model the state of equilibrium of a shaft exposed to static and dynamic dry friction, in order to calculate the necessary force and torque to generate an imminent movement in the links. Furthermore, the design of the circuits required for the correct operation of the robot was included in the electronic analysis. The driver designed has power stages that allow to control the stepper motors, and gearmotors that are more common for students, to facilitate the robot implementation. On the other hand, for ensuring the movement of this type of mechanisms, the authors proposed an algorithm to plan the trajectory of any fixed robot, having in mind the obstacles in its operating environment. Finally, the authors present the development of a pedagogical program that facilitates students' interaction with the homogeneous transformation matrices and the Scara, anthropomorphic and Cartesian robots. In addition, the software is in charge of creating the interface to communicate the mechanism and the user, to perform routines that allow the robot to carry out any task.

The results indicate that the software is a completely functional tool, useful to work on the most basic concepts of robotics and to implement them physically through the designed Scara, or other robots offered by the program. Besides that, it was evinced that it is possible to create routines that allow the robot to manipulate objects, by implementing the trajectory planning algorithm.

1. GENERALIDADES

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1.1 Antecedentes del problema

El hombre siempre ha buscado a lo largo de la historia crear mecanismos que se asemejen a los movimientos de los seres vivos, en esta búsqueda se empezaron a construir máquinas que fueran capaces de recrearlos a la perfección (1). Dichos mecanismos fueron denominados por los griegos como autómatas (1) y se utilizaron con el propósito de entretener a las personas. La construcción de dichos mecanismos era artesanal y se hacía uso de dispositivos hidráulicos y mecánicos como poleas. Con el paso del tiempo se desarrolló la idea de que estos mecanismos podían ser mejorados y empleados para realizar tareas específicas, sin embargo, estos avances se hicieron realidad hasta finales del siglo XX y comienzos del siglo XXI debido al desarrollo tecnológico que se presentó.

Al final del siglo XX el uso de máquinas programadas empezó con la necesidad de realizar trabajos potencialmente peligrosos para la integridad humana (1). Esto motivó el diseño y creación de máquinas capaces de manipular objetos en un entorno de operación limitado, sin embargo, para esa época, aún no se utilizaban máquinas para automatizar procesos industriales. Fue hasta 1961 que se utilizó el primer robot para transportar piezas de metal dentro de una línea producción (2). Este conjunto de sucesos fue el punto de partida de la robótica como rama de la ingeniería, ya que implicaba el estudio de áreas del conocimiento como la mecánica, la electrónica, la informática y la teoría de control.

El surgimiento de la robótica y el desarrollo tecnológico provocó el incremento en la demanda de máquinas programables. Estas máquinas debían tener la capacidad de desarrollar tareas a una velocidad mayor y garantizar la adaptabilidad a las distintas áreas del proceso de producción. En la actualidad, el uso de robots industriales ha optimizado gran parte de las líneas de producción a nivel mundial, sin embargo, es necesario considerar que dichas contribuciones para mejorar e innovar en la industria robótica se fundamentan por la formación académica de los ingenieros. Actualmente existen empresas que tienen kits de diferentes tipos de robots (3), estos prototipos se enfocan en dar una solución interactiva que mejore el aprendizaje de robótica, sin embargo, suelen ser muy costosos por lo que es muy difícil de adquirir por un estudiante.

1.1.2 Descripción del problema

La industria ha sido desde hace años un área de aplicación muy conocida de la robótica, actualmente, muchas tareas requeridas para la manufactura de productos utilizan robots con el objetivo de disminuir tiempo y aumentar la precisión de los procesos. Sin embargo, su fabricación abarca un diseño complejo y con materiales de alto costo que no resultan viables en el ámbito académico.

Actualmente, la pedagogía en robótica se basa en comprender los conceptos que fundamentan la teoría (cinemática inversa, directa, Matrices de transformación homogénea) para poder generar una aplicación práctica (prototipo) que corrobore dichos conceptos, sin embargo, esta alternativa no facilita la visualización de los conceptos en la práctica por lo que afecta la apropiación de estos por parte de los estudiantes. Una alternativa para mejorar el aprendizaje es utilizar los kits de robótica que distribuyen las empresas en el mercado, dichos kits ofrecen soluciones interactivas para que el estudiante pueda apropiarse mejor el conocimiento, no obstante, estos kits suelen ser muy costosos ya que en algunos casos el diseño de estos prototipos se realiza con el objetivo de que puedan ser implementados en la industria (3) en caso de ser necesario.

La Universidad Piloto de Colombia permite a los estudiantes acceder a un robot industrial antropomórfico que se encuentra en el laboratorio de robótica, esta máquina tiene un costo elevado por lo que debe manipularse con cuidado y con supervisión del profesor encargado, ya que no considera posibles fallas operacionales de parte del estudiante. Se debe tener en cuenta que dichas fallas operacionales pueden provocar daños en una máquina cuya reparación puede tener costos elevados.

1.1.3 Formulación del problema

¿Cómo es posible mejorar el aprendizaje de conceptos sobre la robótica?

Actualmente, la pedagogía de estudio para este tipo de temas se enfoca en el análisis de conceptos teóricos. Debido a esto es posible mejorar el aprendizaje de estos conceptos a partir de la simulación y la práctica. Teniendo en cuenta que un prototipo físico da la posibilidad de aplicar los conceptos aprendidos, lo que representa una alternativa de aprendizaje que parte de la visualización de conceptos y aplicación de estos mismos.

1.2 JUSTIFICACIÓN

En la actualidad, las universidades enfocan el aprendizaje de la robótica en el análisis de conceptos teóricos, esto conlleva a que los estudiantes construyan prototipos para luego aplicar los conocimientos aprendidos, sin embargo, el proceso de diseño de un robot es demorado y hace que el estudiante se enfoque más en esto que los conceptos mismos. Esto significa que, si se posee un diseño funcional, los tiempos para la creación del robot se pueden disminuir y por lo tanto se puede enfocar más al estudiante en aprendizaje de los conceptos.

Por otro lado, otra alternativa de estudio es aplicar los conocimientos aprendidos en un robot industrial. Actualmente la Universidad Piloto de Colombia posee un robot antropomórfico en sus instalaciones que es utilizado para mejorar el aprendizaje e incentivar el interés de los estudiantes en la robótica por medio de prácticas de laboratorio, sin embargo, su costo es muy elevado y requiere que el estudiante tenga precaución al manipularlo ya que un daño en algún componente de su estructura puede ser costoso de reparar.

Por lo anterior surge la necesidad de crear un prototipo que a través de un software sea una alternativa de estudio para los estudiantes de ingeniería. Este prototipo está fabricado con

elementos comerciales y representa una opción más económica y de fácil construcción para el ámbito académico.

Adicionalmente, una ventaja del proyecto es la posibilidad de usar un algoritmo de planeación de trayectoria en cualquier tipo de robot fijo. Este brinda al estudiante una herramienta aplicable en diversas áreas de la ingeniería. Por último, el estudiante puede comprender los conceptos básicos como la cinemática directa, inversa y la matriz de transformación homogénea por medio de un objeto virtual que le permite visualizar la teoría a partir de la simulación y la práctica de laboratorio.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general

Diseñar e implementar un robot SCARA que permita realizar múltiples tareas controladas por software, y que pueda ser utilizado con fines pedagógicos.

1.3.2 Objetivos específicos

- Diseñar mecánicamente el prototipo de un robot SCARA para que soporte un estado de carga predefinido.
- Diseñar e implementar etapas de potencia y circuitos impresos que garanticen la funcionalidad del prototipo.
- Diseñar e implementar un software para el control de las principales funciones que realiza del prototipo.
- Diseñar un algoritmo que genere la planeación de trayectoria del robot.
- Desarrollar un objeto virtual de aprendizaje que facilite la comprensión y aprendizaje de conceptos sobre robótica a estudiantes de mecatrónica.

1.4 DELIMITACIÓN DEL PROYECTO

1.4.1 Alcances y limitaciones

1.4.1.1 Alcances

- Los controladores diseñados podrán ser implementados en motores reductores y motores paso a paso.
- Cumplimiento de diferentes funciones gracias a la posibilidad de cambiar efector final.

- El software explicará y simulará el funcionamiento de los siguientes elementos: matrices de rotación, matrices homogéneas, robot Scara, robot Antropomórfico y robot Cartesiano.
- El software controlará el movimiento que debe generar el robot Scara y lo guiará para cumplir el trabajo impuesto por el usuario.

1.4.1.2 Limitaciones

- El robot Scara es diseñado sólo para soportar las cargas diseñadas, una incorrecta implementación producirá deformaciones en los eslabones y una posible falla.
- Cuando el prototipo se encuentre realizando una tarea no será capaz de detectar obstáculos que no hayan sido agregados a la base de datos del sistema.
- El mecanismo del robot no es capaz de detectar errores del usuario respecto a la ubicación correcta del efector final y del objeto sobre el cual trabaja.
- Las condiciones de diseño del robot no están adaptadas a ambientes industriales.
- El robot no será capaz de detectar por sí mismo fallas del mecanismo, por lo que debe ser revisado según el tiempo estimado de diseño.

1.4.2 Línea de investigación del programa

El enfoque del proyecto busca desarrollar un prototipo de un robot Scara que sea de utilidad a los estudiantes del programa, debido a esto y al enfoque pedagógico en conceptos de robótica, el proyecto se ajusta a la línea de investigación de robótica y biomecatrónica.

1.5 MARCO REFERENCIAL

1.5.1 Estado del arte

Desde la implementación del primer robot industrial utilizado para transportar piezas en una línea de producción (2), el uso de máquinas programadas se ha extendido a una gran variedad de aplicaciones con el propósito de optimizar diversas actividades que requieren precisión y rapidez. Debido a esto es posible encontrar que los estudios en el campo de la robótica aumentan con el pasar del tiempo y tienen el objetivo de adaptarse a entornos con características específicas para garantizar la funcionalidad y la robustez para el desarrollo de actividades, por ejemplo, en una investigación realizada por estudiantes de la universidad de Pamplona (4) se utiliza un robot antropomórfico para aplicaciones culinarias. Dicho robot debe manipular alimentos como pan, salchichas para la preparación de perros calientes teniendo en cuenta la cinemática directa e inversa para lograr la trayectoria teniendo en cuenta un plano de referencia. Otra aplicación de la robótica es la agricultura. En la investigación de Christian Correa y Lorenzo Vásquez (5) desarrollan un robot móvil con el objetivo de eliminar la maleza en los cultivos, para esto, los autores analizan algoritmos de planeación de trayectoria como el A*, modelo cinemático del robot, aproximación de Euler y curvas de Bézier para comprobar cual tiene menos error en dicha aplicación y poder generar la mejor trayectoria posible.

En el sector académico, la robótica se enfoca en mostrar a los estudiantes de ingeniería los componentes teóricos que son aplicables a un robot, esto representa la base del conocimiento

fundamental para que el ingeniero pueda diseñar un prototipo, asimismo es el punto de partida para los autores que presentan avances en investigación en diferentes áreas de la ingeniería.

A inicios de 1990 la mayoría de las aplicaciones en la robótica se desarrollaban en el sector industrial. Esto implicaba que muchas tareas fuesen desarrolladas por robots de base fija (1), sin embargo, al mismo tiempo, iniciaron investigaciones de varios grupos de investigación que planteaban generar aplicaciones de los robots en varias tareas cotidianas que se encontraban dentro del entorno humano. En el año 2005 un grupo de investigación de la Universidad Carlos III de Madrid desarrolló un robot antropomórfico para servicio humano (6) que pudiese contribuir con la elaboración de diferentes tareas teniendo en cuenta que el robot debía cooperar con los humanos. En este estudio los autores plantean el diseño de un robot antropomórfico teniendo en cuenta que los robots industriales no están adaptados para poder realizar tareas conjuntas con los humanos. El diseño consta de una estructura liviana que mantiene una distribución uniforme del peso garantizando el equilibrio de la máquina. Adicionalmente realizan el mapeo utilizando micro cámaras y telémetros láser, estos realizan el mapeo del entorno y le proporcionan al algoritmo que funciona bajo el principio de los diagramas de Voronoi los datos necesarios para obtener la trayectoria. Finalmente, para el manejo de datos proponen el uso de una arquitectura modular para gestionar los datos de todos los algoritmos y dispositivos de la máquina. Este estudio utiliza elementos de alto coste que no son viables para el uso estudiantil, sin embargo, maneja los datos de forma rápida y eficiente con el uso de la arquitectura modular lo que facilita la interacción de los sensores con los diferentes algoritmos del robot. Por último, el algoritmo que funciona bajo el principio de los diagramas de Voronoi es una buena alternativa para obtener la trayectoria del robot, sin embargo, este algoritmo no da la posibilidad de obtener la trayectoria más corta ya que únicamente obtiene los espacios en los que puede estar el robot a través de distancias euclídeas.

En la investigación realizada por Andueza y Aguirre (7) se presenta un robot antropomórfico con fines educativos que tiene el objetivo de apoyar el aprendizaje robótica y automatización. Los autores plantean como requerimientos de diseño que el prototipo sea liviano y que sea fácil de manipular por el estudiante que lo utilice, por lo que diseñan una estructura utilizando perfiles de aluminio que permiten crear cada uno de los eslabones para unirlos finalmente con ejes del mismo material. Esta investigación tiene la ventaja de que los autores realizan una comparación de las alternativas que pueden ser utilizadas para lograr un movimiento adecuado del prototipo, estableciendo ventajas y desventajas de cada una de las opciones que pueden garantizar el funcionamiento de la máquina. Un ejemplo de lo anterior se encuentra en la selección de los actuadores para el movimiento de los eslabones, los autores realizan la comparación entre actuadores eléctricos, neumáticos e hidráulicos, esto les permite conocer las restricciones y utilidades que cada uno puede aportarle al diseño. Por último, el prototipo está construido con elementos comerciales de bajo coste lo que permite que un estudiante pueda replicar el prototipo con facilidad.

El diseño de mecanismos y algoritmos de control constituye una parte fundamental para el funcionamiento adecuado de un robot fijo. En el año 2009 Cesar Jiménez desarrolla un proyecto con el objetivo de brindar una herramienta didáctica que permita comprender conceptos en robótica (8). En este proyecto se diseña un prototipo de un robot tipo scara de 4 grados de libertad que pueda manipular objetos en un área de trabajo definida. Dicha sujeción de objetos es realizada por un gripper que es fabricado por medio de prototipado rápido. Este tipo de mecanismos mejoran el agarre del objeto sujetándolo de forma temporal aplicando una fuerza

sobre el mismo, restringiendo su movimiento en el espacio, por lo que son una buena alternativa para manipular objetos. Para el control de actuadores el autor plantea obtener los controladores realizar un control mono articular (8) diseñando controladores PID y tacométricos para el modelo dinámico. Adicionalmente implementa un algoritmo de visión de máquina para lograr posicionar el robot en el espacio con respecto a un plano de referencia, identificando los objetos que se deben manipular por medio de concentraciones de color en el espacio de trabajo. Esta alternativa mejora el desempeño del robot ya que permite aplicar diferentes técnicas de control a partir del modelo mono articular, sin embargo, puede ser una alternativa más compleja debido a que requiere un desempeño aceptable de los controladores en el entorno de trabajo.

Finalmente, el algoritmo de visión de maquina permite una digitalización del entorno con una buena confiabilidad ya que es posible detectar el objeto por medio de características discriminantes. Adicionalmente, el algoritmo maneja cambios de iluminación y escala por lo que su desempeño en entornos con gran variabilidad de dichas características es adecuado.

De las fuentes consultadas en esta sección se evidencia que existen diferentes diseños de robots para resolver problemas tanto industriales como cotidianos teniendo en cuenta que cada problema posee características específicas que deben ser consideradas al momento de plantear la solución, sin embargo, no es muy común encontrar que un prototipo enseñe robótica utilizando teoría y práctica al mismo tiempo. En la pedagogía, la mayoría de las fuentes consultadas se encargan de mostrar al estudiante por medio de la practica el refuerzo de conceptos sobre robótica, Lo anterior no es suficiente cuando el estudiante se acerca por primera vez en esta área de estudio. Debido a esto se desarrolla a lo largo del documento el diseño de un robot Scara multifuncional que genera una alternativa de aprendizaje para estudiantes interesados en esta área de estudio

1.6 MARCO METODOLÓGICO

El desarrollo de este proyecto inicia con la selección del robot que se va a construir, para esto, se tiene en cuenta las características de cada robot fijo y se escoge el Scara por ser un robot fácil de construir y replicar. Después, se indaga en libros y artículos sobre metodologías de aprendizaje en robótica y se concluye que el mejor método de aprendizaje es por visualización de conceptos.

Teniendo el método de pedagogía seleccionado, se inicia la construcción del prototipo. Para esto, primero se diseña el componente mecánico utilizando software especializado, después, se consultan catálogos industriales, virtuales y libros especializados con el objetivo de conocer los posibles sitios en donde se podían adquirir los elementos mecánicos y así obtener información requerida para los cálculos mecánicos del prototipo. Estos cálculos se hacen teniendo en cuenta que la carga máxima en el extremo del robot es de 1 kilogramo fuerza.

Después del diseño mecánico, comienza el diseño de los circuitos que se utilizan para controlar los motores y las demás funcionalidades del prototipo. Inicialmente, se escogen motores paso a paso debido a que son más fáciles de controlar y su precisión es adecuada para la aplicación. También, se realizan cálculos para seleccionar algunos elementos del circuito. Después, se diseñan dos circuitos impresos utilizando Proteus, uno para la alimentación y otro para manejar los motores del circuito.

Por otra parte, para el diseño del software que controla todo el mecanismo y el aprendizaje del estudiante se estudia el algoritmo flood fill (9) y dos libros de robótica (10) (2). Con el algoritmo flood fill se logra generar la planeación de trayectoria del robot fijo evitando los obstáculos presentes en el área de trabajo, teniendo en cuenta las restricciones físicas de construcción. Y Con los libros se selecciona los temas más influyentes en robótica, para crear una interfaz de usuario que muestra cada tema realizando simulaciones en caso de ser posible.

2. DISEÑO MECÁNICO

En esta sección se explica y muestra la estructura que se ha escogido para el robot SCARA de tres grados de libertad. Cada elemento que se aborda, si está experimentando cargas considerables, es analizado mediante el cálculo del factor de seguridad a la fatiga. Para que de esta manera se argumente que la estructura es confiable para el tiempo de vida escogido. Se ha prestado gran importancia a los materiales implementados ya que el mecanismo debe ser replicado por estudiantes de ingeniería de primeros semestres, los cuales están familiarizados con el “modelado por deposición fundida” (11) y el corte a láser mediante máquinas CNC. Esto significa que la facilidad de replicar la máquina es un parámetro fundamental en todo este diseño y por lo tanto se deben escoger los materiales más comerciales y económicos posibles para la línea estudiantil. Además de materiales comerciales, los actuadores mecánicos deben ajustarse a esta misma idea. Por lo que el robot no puede limitarse a funcionar con sólo un motor. La idea es permitir el acople de motores que sean de alto torque o de gran precisión sin comprometer el funcionamiento del robot, para que los estudiantes puedan manipular la precisión de la estructura según sus necesidades.

Los diseños que se muestran a continuación se crean mediante el Software inventor y se sustentan bajo las teorías presentadas en la siguiente referencia (12). La ventaja al implementar dicho CAD en el diseño de piezas radica en que permite calcular los esfuerzos de una manera mucho más exacta de lo que se podría hacer mediante ecuaciones convencionales. Es importante tener presente que los datos obtenidos mediante el análisis por elementos finitos se hacen para una situación estática, luego aplicando los factores de reducción se calcula la resistencia a la fatiga. Para finalmente calcular el factor de seguridad de la pieza. Si se obtiene un resultado deseado, se da paso a analizar la siguiente pieza.

Los temas que se tratan en esta sección se muestran a continuación:

- Material implementado en el modelado por deposición fundida
- Diseño del gripper (efector final)
- Dimensionamiento de los eslabones del robot Scara de tres grados de libertad
- Eslabones rotacionales
- Eslabón prismático y base del robot

2.1 MATERIAL IMPLEMENTADO EN EL MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

El material que se ha escogido para la creación de piezas mediante la impresión 3d es el PLA(Ácido poliláctico) ya que es un material que permite tiempos más rápidos de impresión que el ABS, material ampliamente usado en estas aplicaciones. Además de esto, el PLA permite ser impreso sin aumentar la temperatura de la cama, disminuyendo la cantidad de energía necesaria para la creación del robot. Según las especificaciones del proveedor (13) el PLA alcanza niveles superiores al ABS respecto al esfuerzo último a la tensión, por lo que esta es una razón más para implementarlo. Sin embargo, el PLA muestra desventajas respecto a la temperatura a la cual se genera la distorsión, cuyo valor es de 56°C. De todas maneras, el robot Scara se ha pensado de tal

manera que funcione en un ambiente estudiantil, por lo que no se espera que experimente temperaturas superiores a 36°C.

Es importante conocer que el estudio mecánico que se le ha dado a los materiales usados en la impresión 3d es reducido y es difícil encontrar datos experimentales respecto a la falla por fatiga. Además de esto, los estudios encontrados son hechos con un material que no proviene del mismo fabricante, lo que da mayor incertidumbre, ya que se ha observado variaciones de hasta 12MPa respecto al dato del esfuerzo último a la tracción de distintos proveedores. Sin embargo, las variaciones pueden ser aún mayores ya que este esfuerzo varía según el color del material y las propiedades de impresión.

El estudio realizado en la referencia (14) demuestra que la resistencia del material no solo depende del tipo y color del material, el esfuerzo último a la tensión de una pieza se ve gravemente afectado por el tipo y cantidad de relleno que se ha configurado. Este efecto en combinación con la falta de adherencia entre las capas creadas por la impresora 3d puede hacer que una pieza alcance un 18.6% del esfuerzo que menciona el proveedor. Por ejemplo, en dicho estudio se está implementado el material “PLA Natureworks® Ingeo 4032D” el cual se le clasifica con una resistencia última a la tensión de 53MPa. En las pruebas realizadas se determina que aquel material alcanza una resistencia de 9.85MPa con un relleno del 10% y un mallado en ángulo de 45°. Sin duda alguna esta diferencia es significativamente alta y puede empeorar una vez se calcule la resistencia a la fatiga.

Para los cálculos posteriores es importante conocer si el material se considera dúctil o frágil, según la referencia (12) un material se puede considerar dúctil si su elongación a la fractura es mayor al 5%. Según el proveedor (13) la elongación a la fractura es del 8%, por lo que se considera como un material dúctil.

El valor de la fluencia es imprescindible debido a que, para esta situación, se considera la falla del elemento una vez se llega a la zona plástica. Los resultados hallados en la referencia (14) respecto al diagrama esfuerzo-deformación ingenieril del PLA se muestra a continuación:

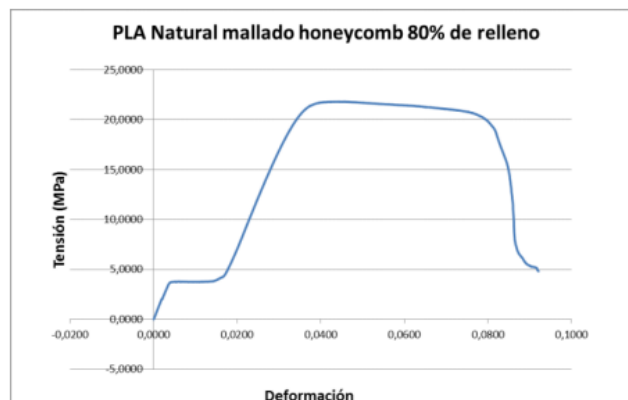


Ilustración 1 Gráfica de esfuerzo deformación ingenieril para PLA natural (14).

Esta gráfica revela que el esfuerzo a la fluencia del material “PLA Natureworks® Ingeo 4032D” es de aproximadamente 4.8MPa cuando se usa un mallado tipo panal con un relleno del 80%. Mientras que el esfuerzo último a la tracción es de 21.08MPa. Es decir que el esfuerzo último se ha reducido aproximadamente en un 40% del valor referenciado por el proveedor.

La referencia (15) , al igual que la referencia anterior, realiza pruebas de tracción para caracterizar las propiedades mecánicas del PLA. En dicho trabajo se crean las probetas con el mismo tipo de material nombrado anteriormente, con un relleno del 100%. Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

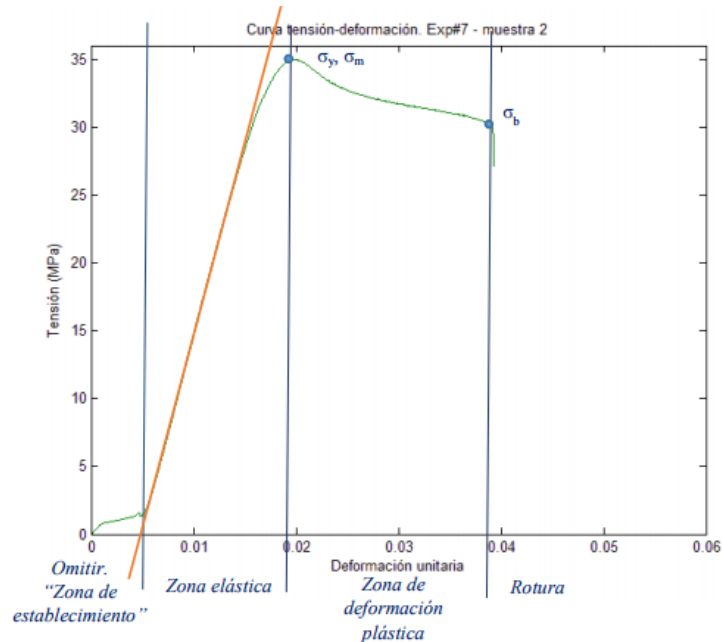


Ilustración 2 Gráfica de esfuerzo deformación ingenieril para PLA natural (15)

Las gráficas difieren bastante. Lo anterior argumenta que el tipo de relleno y las características de impresión pueden afectar enormemente las propiedades del objeto impreso. Los resultados no solo muestran esfuerzos superiores a los obtenidos en la ilustración 1, se puede notar que ahora el material tiene un esfuerzo a la fluencia igual al esfuerzo último a la tracción.

Como el proveedor (13) no indica un esfuerzo a la fluencia y únicamente entrega el esfuerzo último a la tensión del material, se aproxima la fluencia del material al esfuerzo último. Y como tampoco indica datos que permitan predecir cómo puede estar variando la fuerza última del material luego de una impresión, se implementa el dato que publica para el material PLA.

Por lo tanto, para el material PLA se implementan las relaciones de las ecuaciones 1 y 2:

$$S_{ut} = 65MPa \quad (1)$$

$$S_y = 65MPa \quad (2)$$

A continuación, se presenta una gráfica que muestra los resultados obtenidos en la referencia (16) acerca del efecto de la fatiga en dos tipos de material PLA mediante una gráfica S-N.

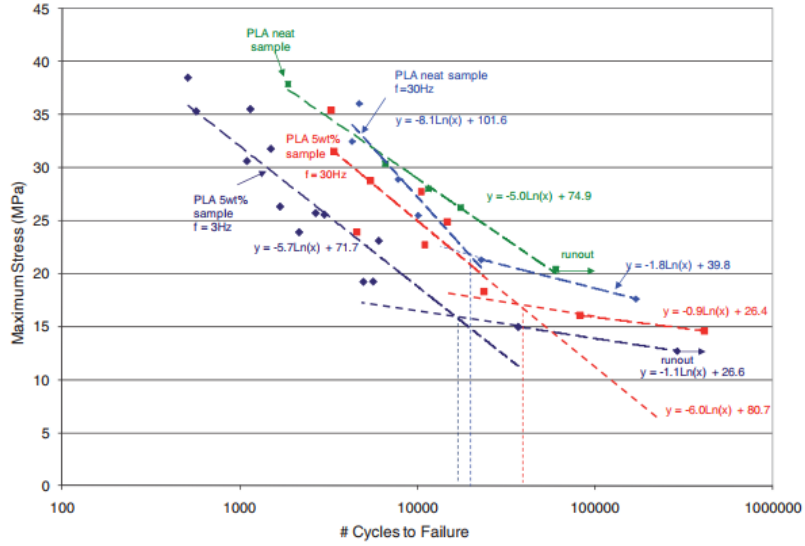


Ilustración 3 Gráfica S-N para dos tipos de material PLA (16).

Los datos de la ilustración 3 muestran el comportamiento de dos materiales llamados “PLA neat” y “PLA 5wt%” cuando son sometidos a cargas cíclicas. Cada uno de ellos posee un esfuerzo último a la tensión de 58MPa y 49MPa respectivamente. En la gráfica el material que presentó el menor esfuerzo a la fatiga fue el PLA 5wt% para una carga que se aplica a una frecuencia de 3Hz. De dicha gráfica se pueden obtener los siguientes datos.

Material PLA 5wt% con carga aplicada a 3Hz:

$$S_{f'@1E3} \cong 32.32MPa \cong 0.66 \cdot S_{ut} \quad (3)$$

$$S_{f'@18.1E3} \cong 15.8MPa \cong 0.32 \cdot S_{ut} \quad (4)$$

$$S_{f'@1E5} \cong 13.93MPa \cong 0.28 \cdot S_{ut} \quad (5)$$

Los tres datos representan puntos importantes en la gráfica S-N, el primer dato es el punto en donde se considera que el material ha ingresado al régimen de fatiga de ciclo alto (HCF). El siguiente dato representa un punto de la gráfica donde parece existir una articulación de rodilla y luego se finaliza con un dato luego de dicha articulación. Es notorio que la fatiga continúa descendiendo luego de la articulación de rodilla, por lo que se puede afirmar que el material no posee vida infinita como en el caso de los aceros, para los cuales la articulación de rodilla se puede ver como en la ilustración 4.

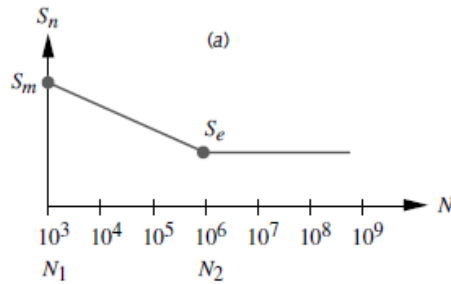


Ilustración 4 Gráfica S-N para un material con articulación de rodilla (aceros) (12)

Para poder realizar todos los cálculos a fatiga del material PLA “esun” se supone que este debe tener las mismas características que las obtenidas en las ecuaciones 3 a 5. Se espera que esta aproximación sea conservadora ya que se ha obtenido de la ecuación que arroja el menor esfuerzo a la fatiga de la ilustración 3.

Para el material PLA implementado los esfuerzos a fatiga son:

$$S_{f'@1E3} \cong 0.66 \cdot 65MPa = 42.9MPa \quad (6)$$

$$S_{f'@18.1E3} \cong 0.32 \cdot 65MPa = 20.8MPa \quad (7)$$

$$S_{f'@1E5} \cong 0.28 \cdot 65MPa = 18.2MPa \quad (8)$$

Por lo que la diagrama S-N con el que se aproxima la fatiga del material es:

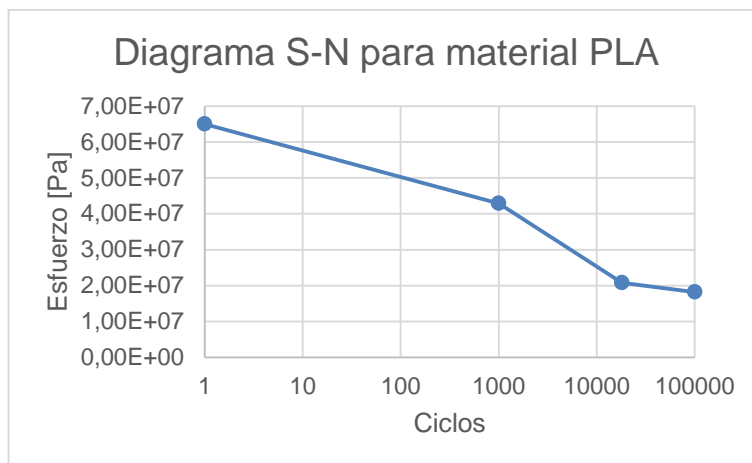


Ilustración 5 diagrama S-N aproximado para el material PLA.

Todos los diseños que se crean mediante el método por deposición fundida están argumentados mediante los datos anteriores. Se recuerda los resultados que se han escogido son aproximaciones burdas por falta de información por parte del proveedor. Si se crean las piezas con otro tipo de relleno, se puede esperar que el objeto tenga una menor resistencia a la tracción y que por lo tanto la resistencia a la fatiga sea menor para el tiempo de vida estimado.

Con el fin de evitar que el robot contenga piezas que sean poco comerciales o poco económicas, se crea más del 80% de la estructura mediante el prototipado rápido. Sin embargo, algunos diseños se crean mediante el corte a láser de madera MDF, ya que los tiempos y costos de este proceso son realmente bajos.

2.2 DISEÑO DEL GRIPPER (EFECTOR FINAL)

Para el diseño de la herramienta de trabajo del robot se piensa en una estructura la cual sea capaz de alzar elementos que comúnmente se pueden encontrar en un salón de clases. Dependiendo de la fuerza y la dimensión mínima de apertura necesaria, se inicia con el dimensionamiento de los eslabones de la estructura. A continuación, se muestran algunos de los elementos que se utilizaron como referencia:

Tabla 1 peso y medida mínima de sujeción de tres elementos

Elemento	Distancia mínima de sujeción[mm]	Peso[g]
Calculadora	13	130
Celular	13	228
borrador	15	4
esfero	10	6

tajalápiz	20	13
Escuadra	3	65
libreta	1.3	243

La distancia mínima de sujeción hace referencia a la distancia mínima que debe existir entre las pinzas del gripper para poder sujetar cada objeto. Entre los elementos encontrados el peso máximo y la apertura máxima alcanzó 144g y 2cm.

Además de esos elementos se desea que el robot manipule un cubo con aristas de 4cm el cual es creado mediante la impresión 3d. El peso del cubo está alrededor de los 22g. Según lo anterior, el gripper debe tener la capacidad de levantar cargas de 144g con una apertura máxima de 4cm.

A continuación, se presenta el primer boceto hecho para la configuración de las pinzas:

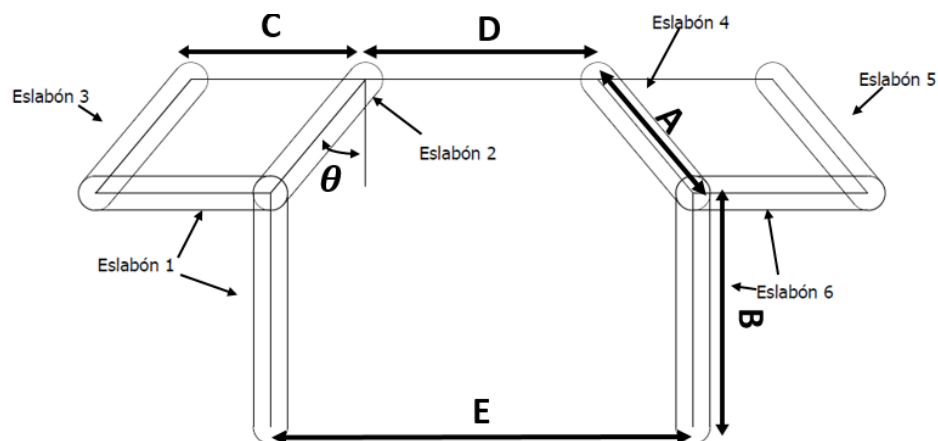


Ilustración 6 Primer boceto del gripper.

La ilustración 6 muestra la forma en la que se piensa la unión de los eslabones que en conjunto representan la pinza del gripper. Los eslabones 2, 3, 4 y 5 son elementos que únicamente se mueven rotacionalmente y que a su vez modifican la posición de los eslabones 1 y 6. El valor que tenga la variable θ es la que determina que tanto se separan las pinzas y por lo tanto controla la acción del agarre. Para entender mejor cómo funciona dicho mecanismo se muestra la misma configuración anterior modificando la posición angular de los eslabones rotacionales:

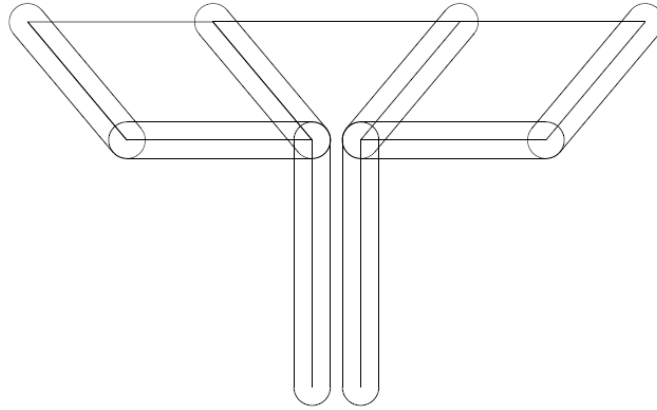


Ilustración 7 eslabones 2,3,4 y 5 en una diferente posición angular.

Note que la distancia entre los eslabones 1 y 6 se ha modificado sin afectar la orientación de los mismos, además de esto, los eslabones 2 y 4 se han desplazado angularmente con la misma magnitud, pero en sentido opuesto, esto significa que debe existir algún mecanismo de transmisión que permita este efecto. El problema inicial es determinar la magnitud de todas medidas mostradas en la ilustración 6, para luego determinar el ancho de cada pieza teniendo en cuenta las propiedades mecánicas del material PLA.

La distancia E, la cual representa la apertura del gripper, debe ser:

$$E = D + 2A \cdot \sin(\theta) \quad (9)$$

Se desea agregar tres centímetros como tolerancia en la apertura del gripper para evitar que el mecanismo falle al momento de tratar de sujetar un objeto que mida exactamente los 4cm. Para la apertura máxima la distancia “E” debe ser equivalente a 7cm mientras que para un cierre total esta debe medir 0cm.

$$70mm = D + 2A \cdot \sin(\theta_1) \quad (10)$$

$$0 = D + 2A \cdot \sin(\theta_2) \quad (11)$$

De las ecuaciones 10 y 11 podemos notar que el agarre del gripper depende únicamente de tres variables (A, D, θ). Antes de escoger cualquier valor para D y A es necesario entender cómo se

comporta las fuerzas en el mecanismo para ciertas posiciones angulares. A continuación, se analiza las fuerzas que están actuando en el eslabón 1:

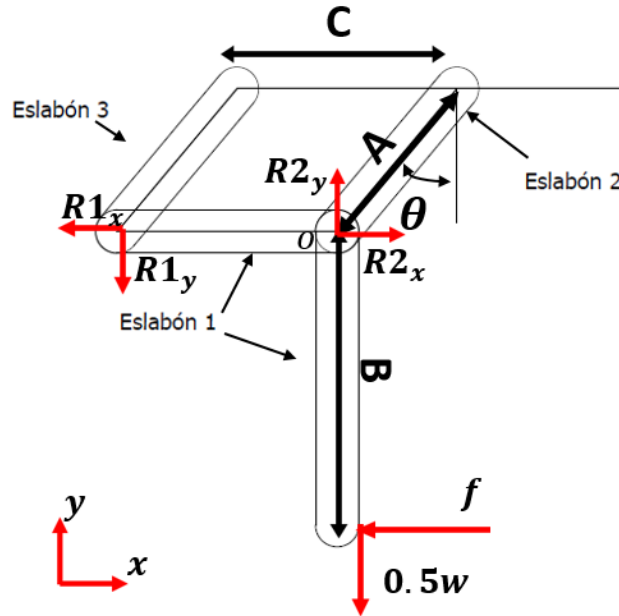


Ilustración 8 fuerzas en las pinzas del gripper.

La fuerza F se produce por el contacto de la pinza con el objeto manipulado, dicha fuerza se encarga de crear la fricción necesaria para poder alzar al objeto. Como el eslabón 6 también debe estar experimentando fricción, se supone que el peso se distribuye uniformemente sobre estos dos elementos. El eslabón 3 es una pieza sometida a dos fuerzas y por lo tanto la resultante R_1 debe tener el mismo sentido que este eslabón. Sabiendo lo anterior, se procede a generar las ecuaciones que expresan el equilibrio del eslabón 1.

Para la fuerza R_1 :

$$|R_1| = \sqrt{R_{1x}^2 + R_{1y}^2} \quad (12)$$

$$\tan(\theta) = \frac{R_{1x}}{R_{1y}} \quad (13)$$

Del equilibrio alrededor del punto o:

$$\sum M_o = 0 = -B \cdot f + R_1 \cdot C \cdot \cos\theta \quad (14)$$

$$R1 = \frac{f \cdot B}{C \cdot \cos\theta} \quad (15)$$

Del equilibrio traslacional se obtiene:

$$\sum F_x = 0 = -R1_x - f + R2_x \quad (16)$$

$$R2_x = f \left(\frac{B}{C} \cdot \tan\theta + 1 \right) \quad (17)$$

$$\sum F_y = 0 = -R1_y + R2_y - 0.5 \cdot w \quad (18)$$

$$R2_y = f \cdot \frac{B}{C} + 0.5 \cdot w \quad (19)$$

Las ecuaciones anteriores permiten calcular las magnitudes de las fuerzas de la ilustración 8. De la ecuación 15 se puede argumentar que el ángulo no debe llegar a un valor de 90°, ya que esto provocaría que la fuerza R1 tienda a infinito. Lo mismo ocurre con la fuerza R2 debido que su componente en x es afectada por el tangente de dicho ángulo. Se desea que la fuerza R1 aumente máximo 1.5 veces del valor mínimo que puede tener, esto se logra con un ángulo de 50°. Una vez se tiene un límite, se puede reemplazar dicho valor en la ecuación 10, la cual queda de la siguiente manera:

$$70mm = D + 2A \cdot \sin(50) \quad (20)$$

Para poder solucionar la ecuación 20 se supone el valor de la variable A y luego se calcula la variable D.

$$A = 30mm \quad (21)$$

$$D = 24mm \quad (22)$$

Para la medida C se opta por escoger un valor de 19.9 mm para mantener el eslabón 3 lo más cerca posible del eslabón 2 sin generar contacto entre ellos, mientras que para la medida B es escoge un valor de 57.5mm con el fin de proveer un buen agarre.

$$C = 19.5mm \quad (23)$$

$$B = 57.5mm \quad (24)$$

A continuación, se presenta el diagrama de cuerpo libre para el eslabón 2 y 4.

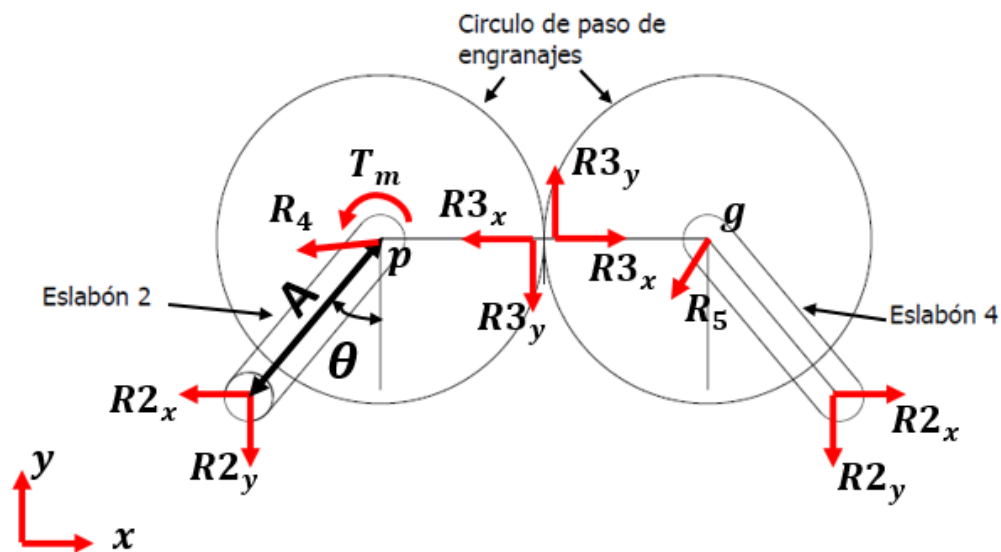


Ilustración 9 Diagrama de cuerpo libre de los eslabones 2 y 4.

Los resultados de las ecuaciones 17 y 19 también son aplicables para el eslabón 4 y por eso se ha agregado las fuerzas R_{2x} y R_{2y} en un extremo de este. La reacción R3 se genera por el contacto de los dientes de cada engranaje, y gracias a esta reacción se transmite el torque del motor T_m al eslabón 4. Como el sistema de engranajes tiene una ganancia unitaria se puede decir que el torque que ejerce la reacción R2 respecto al origen del eslabón 4 se transmite sin modificación hacia el eslabón 2. Según lo anterior, el equilibrio rotacional del eslabón 2 respecto a su origen es:

$$\sum M_p = 0 = 2(-R2_x \cdot A \cos(\theta) + R2_y \cdot A \sin(\theta)) + T_m \quad (25)$$

$$T_m = 2fA \cos(\theta) - w \cdot A \sin(\theta) \quad (26)$$

La ecuación 26 muestra la relación que existe entre el torque del motor y la fuerza con la que se sujeta el elemento. Se puede observar que la situación más crítica, cuando se necesita mayor torque por parte del motor, se produce cuando la variable θ es igual a cero. Por lo que la fuerza mínima de agarre que puede hacer gripper es:

$$f = \frac{T_m}{2A} \quad (27)$$

Comercialmente se encontraron los siguientes servomotores que pueden ser usados en el gripper:

Tabla 2 servomotores comerciales

servomotores	Torque [$kgf \cdot cm$]
SR-1501MG	15.5
MG995	8.5
MG996	9.4
MG90S	1.8
SG90 9G	1.8

De todos los motores encontrados el que se escogió fue el MG996, por a su gran comercialización, gran torque y precio asequible. Implementando un torque de $8.5 kgf \cdot cm$ en la ecuación 27 se calcula la fuerza mínima de agarre que puede hacer el gripper:

$$f = \frac{T_m}{2A} = \frac{8.5 kgf \cdot cm}{2 \cdot 3cm} = 1.416 kgf \quad (28)$$

Como el torque venía expresado en *kgf* el resultado para la fuerza obtuvo dichas unidades en vez de la unidad de fuerza newton, sin prestar atención a esto, el resultado indica que el gripper puede generarla una fuerza equivalente al peso de una masa de 1.416kg. Esto significa que hace una fuerza de 13.9N.

Si se vuelve a observar la ilustración 8, se recuerda que el peso se debe transmitir a la pinza por el efecto de la fricción. La fuerza calculada por la ecuación 28 debe ser suficiente como para crear la fricción mínima que sostenga al elemento. De la referencia (17) se sabe que el modelo más sencillo para representar la fricción seca estática es:

$$F_m = \mu_s \cdot N \quad (29)$$

Donde la variable F_m representa la fuerza de fricción, la variable μ_s es el coeficiente de fricción estático y la variable N es la fuerza normal al área de contacto. En este caso la normal vendría siendo el resultado de la ecuación 28 y la fuerza de fricción tiene que ser mayor o igual a la mitad del peso del objeto. Si se escoge el elemento más pesado de la tabla 1, se puede calcular el valor mínimo que puede tener el coeficiente de fricción seca:

$$\mu_s = \frac{0.5w}{f} = 0.5 \cdot \frac{243g}{1416g} = 0.0858 \quad (30)$$

Para tener una idea de los valores más comunes para el coeficiente de fricción seca, se muestran los datos que proporciona la referencia (17).

Tabla 8.1. Valores aproximados de los coeficientes de fricción estática para superficies secas

Metal sobre metal	0.15-0.60
Metal sobre madera	0.20-0.60
Metal sobre piedra	0.30-0.70
Metal sobre cuero	0.30-0.60
Madera sobre madera	0.25-0.50
Madera sobre cuero	0.25-0.50
Piedra sobre piedra	0.40-0.70
Tierra sobre tierra	0.20-1.00
Hule sobre concreto	0.60-0.90

Ilustración 10 Datos para el coeficiente de fricción seca en algunos materiales (17)

Se puede notar que el coeficiente necesario está por debajo del promedio de los datos de la ilustración 10. Como no se sabe exactamente cuál es el objeto con el que el estudiante

implementará el gripper, no tiene sentido calcular experimentalmente este dato. Lo que se puede esperar es que el material no tenga un coeficiente menor al calculado en la ecuación 30.

Como ya se conoce el torque del motor, es posible calcular las reacciones en el eslabón 1 para cuando sus magnitudes son máximas, $\theta = 50^\circ$.

$$R1 = \frac{f \cdot B}{C \cdot \cos\theta} = \frac{13.9N \cdot 57.5mm}{19.9mm \cdot \cos(50)} = 62.48N \quad (31)$$

$$R2_x = f \left(\frac{B}{C} \cdot \tan\theta + 1 \right) = 13.9N \left(\frac{57.5mm}{19.9mm} \cdot \tan(50) + 1 \right) = 61.76N \quad (32)$$

$$R2_y = f \cdot \frac{B}{C} + 0.5 \cdot w = 13.9N \cdot \frac{57.5mm}{19.9mm} + 0.5 \cdot 2.38N = 41.35N \quad (33)$$

$$R_2 = \sqrt{R2_y^2 + R2_x^2} = 74.32N \quad (34)$$

En la ilustración 9 se mostró que los eslabones 2 y 4 poseen un sistema de engranajes que se encarga de transmitir el torque. Para calcular la forma y esfuerzos que tendrá este elemento se usan las ecuaciones proporcionadas por la AGMA (American Gear Manufacturers Association) (18) (12) para los engranajes rectos. En este momento los únicos datos que se conocen del sistema de engranajes es la distancia entre centros, distancia D (24mm), y la razón de engranaje, la cual debe ser unitaria.

La razón de engranaje se puede expresar como:

$$m_G = \frac{N_g}{N_p} = \frac{r_g}{r_p} = 1 \quad (35)$$

En donde N_g y N_p son la cantidad de dientes del engranaje y el piñón, y las variables r representan el radio de paso de cada uno de ellos. Como la razón del engranaje es unitaria los radios de paso de cada engranaje debe ser idénticos y por lo tanto la distancia entre centros del sistema debe ser dos veces el radio de paso del engrane. Es decir:

$$D = 24mm = r_g + r_p = 2r_g \quad (36)$$

$$r_g = r_p = 12mm \quad (37)$$

La relación para el módulo métrico (12) y el número de dientes es:

$$m = \frac{2r_g}{N} \quad (38)$$

Entre los módulos métricos que se han estandarizado, el que proporciona una cantidad razonable de dientes es $m = 1mm$. Lo que genera 24 dientes para cada engranaje. Para el engranaje se escoge un ángulo de presión de 20° .

En este momento se poseen las dimensiones necesarias para poder realizar un segundo boceto de la forma que puede tener el gripper. Sólo se poseen las dimensiones tentativas para la creación de cada pieza, sin embargo, no se conoce si el grosor de cada pieza soporta las fuerzas internas que se producen.

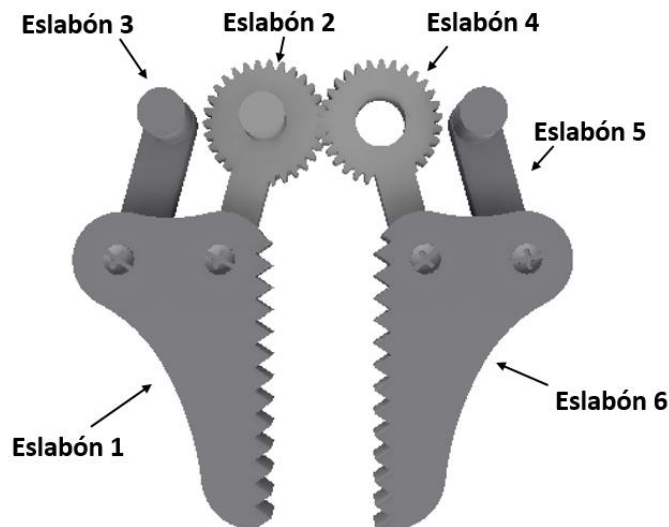


Ilustración 11 segundo boceto para el gripper.

Se ha agregado dientes de sierra en las pinzas para aumentar la presión en el punto de contacto y así facilitar la sujeción de la pieza. Si hay más presión es probable crear pequeñas deformaciones en el objeto que impidan el deslizamiento relativo de este respecto a la pinza.

Para los eslabones 1 y 6 se escoge un grosor de 12mm para lograr una buena distancia de agarre. Tomando en cuenta las fuerzas f y $0.5w$, el estado de esfuerzos en el eslabón es:

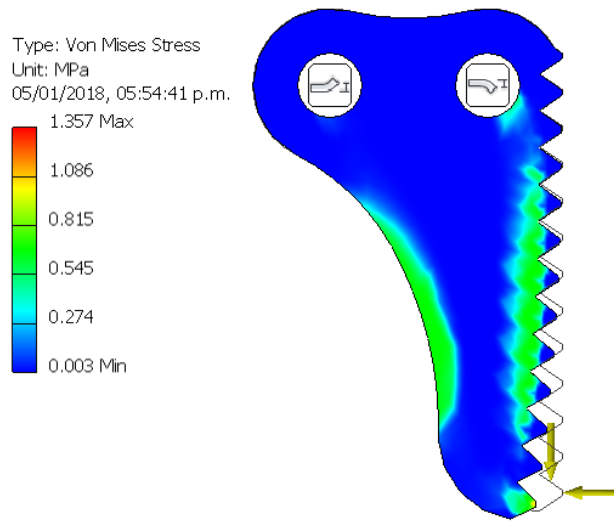


Ilustración 12 Estado de esfuerzos en los eslabones 1 y 6.

La fuerza f se ha ubicado sobre el último diente al igual que el peso el objeto levantado. Un primer análisis revela que por lo menos para una situación netamente estática, el esfuerzo Von mises se encuentra muy por debajo del esfuerzo de fluencia. Eso es un buen indicio, sin embargo, se debe calcular el factor de seguridad a la fatiga. Para esta situación se espera que el gripper por lo menos pueda realizar la acción de sujetar doce mil veces, es decir una cantidad de ciclos igual a $12 \cdot 10^3$. De las ecuaciones 6 y 7 es posible aproximar el comportamiento del material PLA a la fatiga para los ciclos requeridos. Al igual que los resultados de la ilustración 3, la ecuación debe tener la forma:

$$S_{f'@N} = a \ln(N) + b \quad (39)$$

Con los resultados de las ecuaciones 6 y 7 se hallan las contantes de la ecuación 39 y se calcula el esfuerzo último a la tensión para la cantidad de ciclos deseada:

$$S_{f'@12E3} = -7.631 \cdot MPa \cdot \ln(12 \cdot 10^3) + 95.61 MPa = 23.93 MPa \quad (40)$$

Luego de esto se corrige el esfuerzo a la fatiga con los factores de corrección (12).

$$S_{f@12E3} = C_{carga} C_{tamaño} C_{sup} C_{temp} C_{conf} S_{f'@12E3} \quad (41)$$

Para el factor de carga C_{carga} se le asigna un valor igual a 1, ya que la carga produce flexión en la pinza del gripper.

Para el factor de tamaño se escoge el área donde se encuentra el esfuerzo máximo. El área se aproxima a un rectángulo con dimensiones 13.4mmx12mm. siguiendo el procedimiento descrito en la referencia (12) se halla dicho factor:

$$d_{equiv} = \sqrt{\frac{0.05(13.4mm)(12mm)}{0.076}} = 10.28mm \quad (42)$$

$$C_{tamaño} = 1.189(10.28mm)^{-0.097} = 0.948 \quad (43)$$

Los factores de superficie y temperatura que se encuentran en la literatura no contemplan al material PLA, por lo que se suponen con un valor igual a 1.

Para el factor de confiabilidad se escoge una confiabilidad del 50.0%, con lo que se obtiene un factor igual a 1. Esto significa que la resistencia a la fatiga queda:

$$S_{f@12E3} = 1 \cdot 0.948 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 23.9MPa = 22.65MPa \quad (44)$$

El gripper se carga con el mayor esfuerzo únicamente cuando está haciendo la acción de sujetar, mientras que cuando ha soltado el objeto este prácticamente no experimenta fuerzas. Esto revela que toda la pinza se encuentra cargada bajo la acción de una fuerza repetida (12). Para una fuerza repetida la fuerza alternante y media son la mitad de la fuerza máxima aplicada. Si el esfuerzo que arroja inventor es el esfuerzo máximo Von mises, de este se puede calcular el esfuerzo medio y alternante Von mises:

$$\sigma'_a = \sigma'_m = \frac{\sigma'_{max}}{2} = \frac{1.357MPa}{2} = 0.678MPa \quad (45)$$

Para poder realizar los diagramas de Goodman rápidamente calculando los factores de seguridad para los cuatro casos de falla que comúnmente se hallan, se crea un programa el cual es capaz de graficar todos los resultados pertinentes. El diagrama de Goodman para dicha situación es:

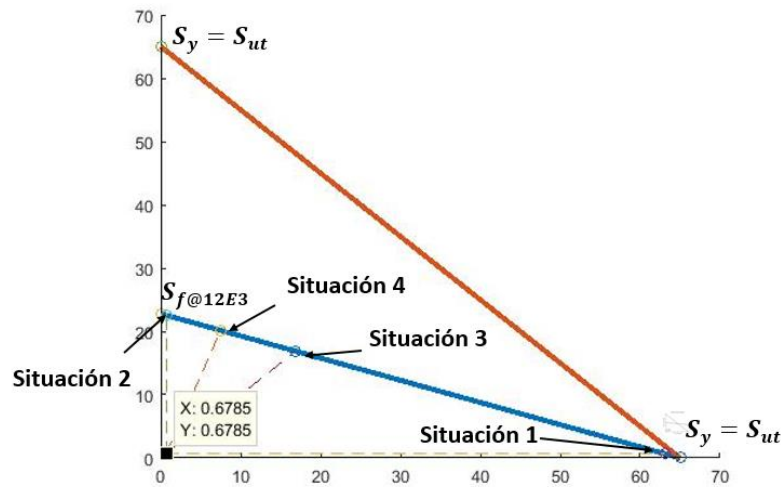


Ilustración 13 diagrama de Goodman modificado para los eslabones 1y 6 del gripper.

La ilustración 13 muestra, mediante líneas punteadas, los cuatro casos de falla que se calculan para un esfuerzo medio positivo. El algoritmo calcula la línea más corta y respecto a esta arroja el factor de seguridad. A continuación, se presenta nuevamente el diagrama de Goodman, pero sólo con la línea más cercana a la falla.

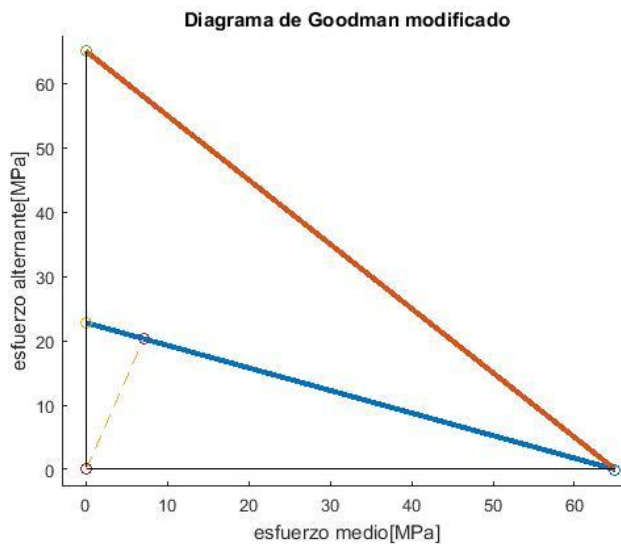
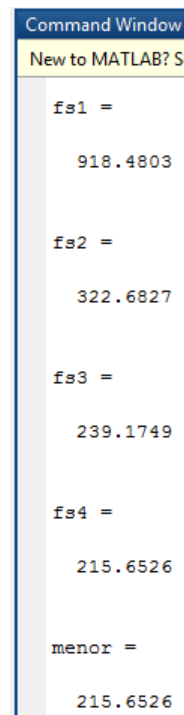


Ilustración 14 Diagrama de Goodman modificado con la línea de falla más cercana.

El software entrega los factores de seguridad de la siguiente manera:



```
Command Window
New to MATLAB? See
fs1 =
    918.4803
fs2 =
    322.6827
fs3 =
    239.1749
fs4 =
    215.6526
menor =
    215.6526
```

Ilustración 15. Resultados del programa respecto al factor de seguridad.

El último número de cada factor de seguridad hace referencia al factor de seguridad para las líneas de falla mostradas en la ilustración 13. El anterior resultado revela que el factor de seguridad para el eslabón 1 es de 215. por lo que este elemento del gripper soportará sin ningún problema la carga que ejerce el motor MG995 sobre este. El algoritmo se ha realizado en el entorno MATLAB, para hacer uso de este puede dirigirse al siguiente link:

https://drive.google.com/open?id=1K-QZRhbWIMAAUVsdOIFbN_MvF-T01GX

Haciendo lo mismo para el eslabón 3 con la fuerza descrita por la ecuación 31, se puede obtener la siguiente situación de esfuerzos:

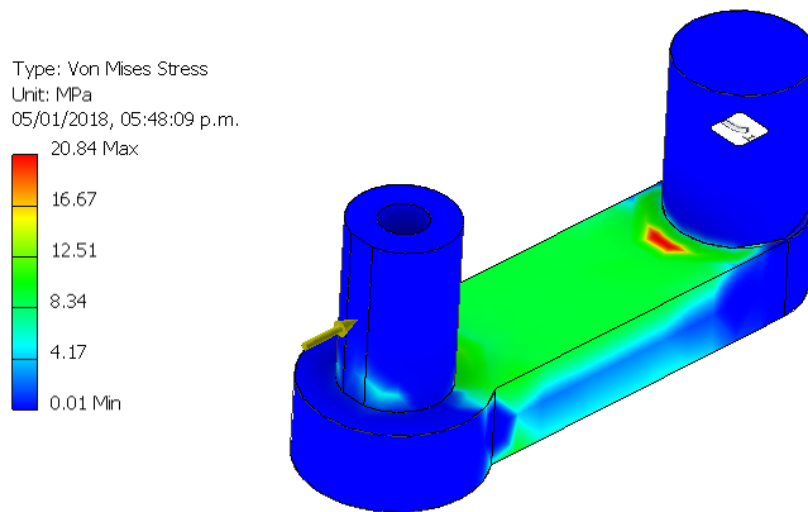


Ilustración 16 situación de esfuerzos para eslabón 3.

Se utiliza la misma resistencia a la fatiga calculada anteriormente, debido a que la cantidad de ciclos es la misma, el material se encuentra a flexión y el factor de tamaño es prácticamente el mismo. Por la ubicación de la fuerza, se puede suponer que el máximo esfuerzo hallado Von mises se encuentra en una sección del elemento que se encuentra a compresión, por lo que el esfuerzo medio debe ser negativo. A continuación, se obtiene el diagrama de Goodman.

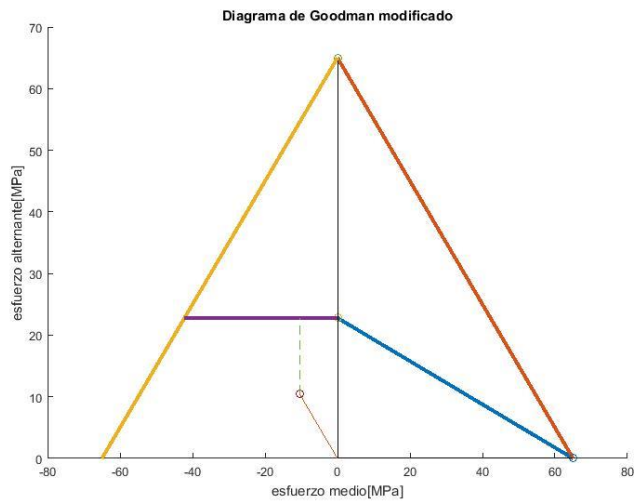


Ilustración 17 diagrama de Goodman modificado para eslabón 3.

Para dicho diagrama, la línea que se encuentra punteada indica la probabilidad de falla con un esfuerzo medio a compresión. Para este caso el factor de seguridad se calcula como si la carga hubiese sido invertida. El factor de seguridad es 1.99.

La ilustración 17 ha implementado el esfuerzo a la fluencia a compresión con un valor igual al de tensión, esto se hace debido a que no se indica esta propiedad en la ficha técnica del PLA. Por lo que se supone un material uniforme.

Para el eslabón 2 y cuatro se calcula únicamente el diente del engranaje, ya que es el que transmite toda la fuerza de las pinzas. En este momento se sabe que el sistema de engranajes posee una razón de engranaje y un módulo unitario, con un radio de paso de 12mm. Para hallar la magnitud de la fuerza que causa flexión en el diente se halla el equilibrio del eslabón 4 en el punto g, ilustración 9.

$$\sum M_g = 0 = R2_x \cdot A \cos(\theta) - R2_y \cdot A \sin(\theta) - R3_y \cdot r_p \quad (46)$$

$$R3_y = \frac{R2_x \cdot A \cos(\theta) - R2_y \cdot A \sin(\theta)}{r_p} = 20N \quad (47)$$

Como el ángulo de presión es de 20°, la fuerza radial es:

$$R3_x = R3_y \cdot \tan(20) = 7.27N \quad (48)$$

La ecuación del a AGMA para hallar el esfuerzo de flexión sobre el diente del engranaje es:

$$\sigma_b = \frac{W_t}{FmJ} \cdot \frac{K_a K_m}{K_v} K_s K_B K_I \quad (49)$$

La variable W_t es la fuerza que causa la flexión, m es el módulo del engranaje y F es el ancho de cara del diente. Los demás términos son constantes que aumentan el esfuerzo calculado. De esta ecuación se desea calcular el ancho de cara para el diente del engranaje. Para lograr esto se empieza calculando los factores:

El factor geométrico J Se calcula mediante la interpolación de los datos de la siguiente tabla:

Tabla 8-9 Factor geométrico J para flexión de la AGMA, para 20°, y dientes de profundidad total con carga del HPSTC

Dientes en el engrane	Dientes en el piñón															
	12		14		17		21		26		35		55		135	
	P	G	P	G	P	G	P	G	P	G	P	G	P	G	P	G
12	U	U														
14	U	U	U	U												
17	U	U	U	U	U	U										
21	U	U	U	U	U	U	0.33	0.33								
26	U	U	U	U	U	U	0.33	0.35	0.35	0.35						
35	U	U	U	U	U	U	0.34	0.37	0.36	0.38	0.39	0.39				
55	U	U	U	U	U	U	0.34	0.40	0.37	0.41	0.40	0.42	0.43	0.43		
135	U	U	U	U	U	U	0.35	0.43	0.38	0.44	0.41	0.45	0.45	0.47	0.49	0.49

Ilustración 18. Factores geométricos J. (12)

Para una combinación de 24 dientes para el engranaje y el piñón se tiene que:

$$J = 0.342 \quad (50)$$

El factor K_a se le asigna un valor igual a uno ya que se considera que se supone que el dispositivo es de funcionamiento suave. El factor K_m se debe escoger según el tamaño del diente, en este caso no se desea un ancho de cara mayor a 50mm, por lo que el factor se le asigna un valor igual a 1.6.

Para el factor K_v el cual se encarga de tomar en cuenta las cargas vibratorias internas depende de la velocidad del motor, que es de 6.5rad/s. La velocidad de los dientes en el punto de paso, con esta velocidad angular, es 78.528mm/s. Valor que es realmente pequeño y hará que el factor dinámico se aproxime a uno.

$$K_v = 1 \quad (51)$$

El factor K_s se supone igual a uno ya que el tamaño del engranaje no es considerable. El Factor K_b toma en cuenta el aro o agujero que tenga el engranaje en su origen, en este caso este aro no es significativo y el factor se supone igual a uno. El factor K_l se aplica cuando se tiene un engranaje loco, es decir un engranaje que recibe un esfuerzo invertido en el diente. En este gripper los engranajes sólo reciben la fuerza en un mismo sentido y por esta razón este factor se supone igual a uno. Según lo anterior el esfuerzo en el diente es:

$$\sigma_b = \frac{R3_y}{F \cdot 0.8mm \cdot 0.342} \cdot 1.6 = \frac{116kN}{F \cdot m} \quad (52)$$

El factor de seguridad para los engranajes puede variar si se conocen los datos para la resistencia a la fátiga por flexión publicados por la AGMA. En este caso para el material PLA no se tiene

información, por lo que se implementa los mismos pasos que se hicieron para los eslabones uno y dos. El límite resistencia a la fatiga que se utiliza para el engranaje es el mismo de la ecuación 44, ya que se aplican la misma cantidad de ciclos a flexión. La ecuación 52 calcula el esfuerzo máximo. Como la carga es repetida el esfuerzo alternante y medio aplicado sólo es la mitad de dicho valor. Y ya que sólo se tiene un esfuerzo axial aplicado en el extremo del diente, los esfuerzos Von mises alternante y medio deben ser igual al alternante y medio aplicado. Es decir:

$$\sigma'_a = \sigma'_m = \frac{\sigma_b}{2} = \frac{58.47kN}{F \cdot m} \quad (53)$$

Si el esfuerzo fuera totalmente invertido, el factor de seguridad sólo contemplaría al esfuerzo último a la fatiga corregido. El cual sería de la siguiente manera:

$$N_b = \frac{S_f}{\sigma'_a} = \frac{22.69MPa}{\frac{58.47kN}{F \cdot m}} = 388 \cdot \frac{F}{m} \quad (54)$$

Esto significa que, si se deseara un factor de seguridad de 2, el ancho de cara debería ser de 5.1mm. aunque este no es el factor de seguridad real, debido a que existe el esfuerzo medio, se puede tener una idea de que valor podría tener el ancho de cara. Para este caso se supone un ancho de cara de 6mm. Por lo que el esfuerzo medio y alternante es:

$$\sigma'_a = \sigma'_m = \frac{58.47kN}{6mm \cdot m} = 9.7MPa \quad (55)$$

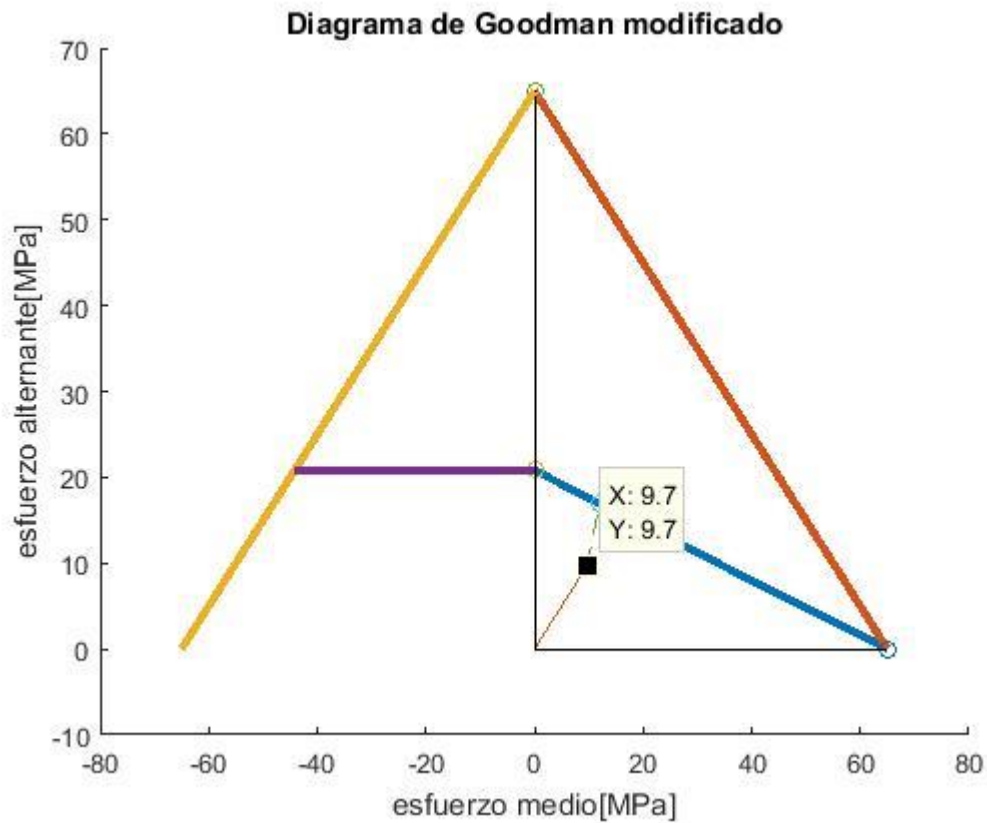


Ilustración 19 diagrama de Goodman modificado para el engranaje.

Para la situación de la ilustración 19, el factor de seguridad es de 1.5. Este valor se redujo por el efecto del esfuerzo medio sobre la línea de Goodman. Se considera que este ancho de cara es apropiado y por lo tanto se implementa en el diseño.

Las piezas que van a contener los engranajes y los eslabones 3 y 5 poseen una dimensión mucho mayor y por lo tanto unos esfuerzos menores. Como los esfuerzos son menores, no se va a calcular más datos respecto al gripper. El resultado final del CAD se ve a continuación:



Ilustración 20 CAD del gripper

2.3 DIMENSIONAMIENTO DE LOS ESLABONES ROTACIONALES DEL ROBOT SCARA (3-DOF)

El robot Scara que se plantea posee un eslabón prismático y dos rotacionales. Cada uno de estos eslabones son los que permiten ubicar el actuador final (Gripper) en la posición deseada. Los límites físicos que tiene este robot dependen netamente de los límites del eslabón prismático y la longitud de los eslabones rotacionales, por lo que es fundamental determinarlos. La forma básica del robot que se plantea se puede ver a continuación:

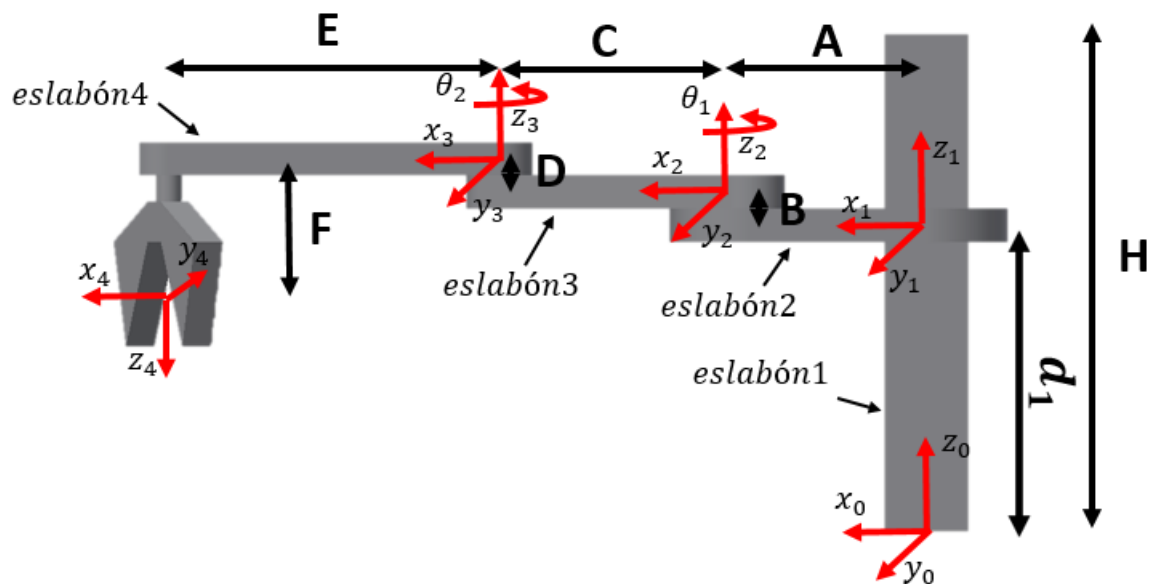


Ilustración 21 Estructura básica del robot Scara de 3-DOF

Las variables d_1, θ_1 y θ_2 son las coordenadas generalizadas del robot. Es decir, las que permiten ubicar el efector final en la posición deseada. Las demás variables representan las longitudes de toda la estructura del robot. La ubicación del gripper en el eje “x” y “y”, según las dimensiones del robot, se puede limitar como se ve a continuación.

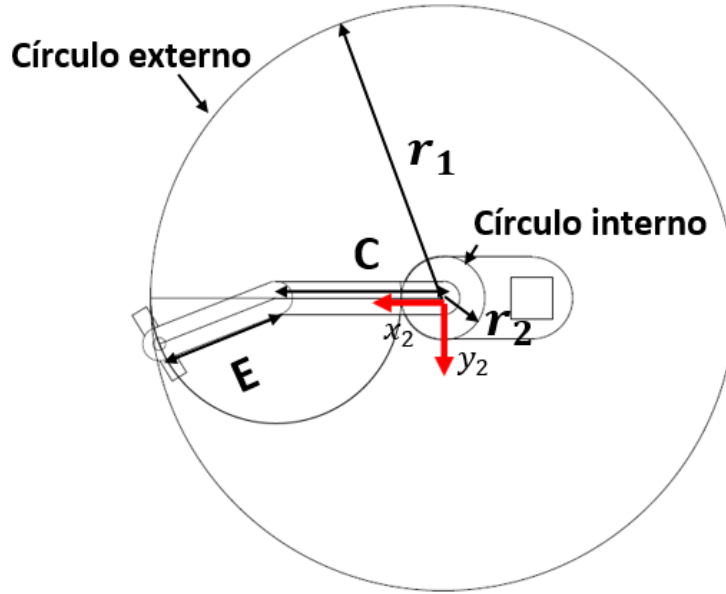


Ilustración 22 Espacio de trabajo del robot Scara en los ejes “x” y “y”.

Según la ilustración 22. El radio interno y externo que limita al gripper respecto al sistema coordenado 2 es:

$$r_1 = E + C \quad (56)$$

$$r_2 = C - E \quad (57)$$

Se desea tener un área de trabajo tal que el gripper se pueda trasladar una distancia máxima de 39cm. Esta distancia permite obtener un espacio de trabajo que se ha considerado aceptable para

realizar la manipulación de objetos. También se desea que el gripper nunca se ubique en el origen del sistema coordenado 2. Por lo que de la ilustración 21, el eslabón 3 debe ser más grande que el eslabón 4. Para continuar con el cálculo se supone que el radio interno es de 30mm. Solucionando las ecuaciones 56 y 57, se obtiene la distancia que debe medir los eslabones rotacionales:

$$E = 18cm \quad (58)$$

$$C = 21cm \quad (59)$$

Sin embargo, la distancia “E” es medida desde el origen del sistema coordenado 3 al 4, donde se encuentra el centro de las pinzas del gripper. Por lo que se debe tener en cuenta la medida G, que se encuentra en la ilustración 23.

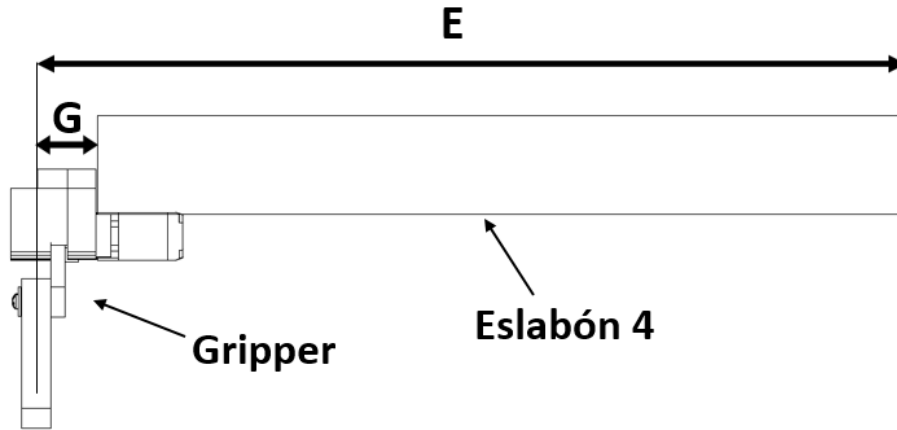


Ilustración 23 eslabón rotacional 4 con gripper.

Para el gripper diseñado, la distancia G es de 2.5cm. Por lo que el eslabón 4 debe medir 15.5cm. La distancia H, en la ilustración 21, representa el largo de las varillas que se acoplan con rodamientos lineales para permitir la traslación en el eje z. Para desplazar el gripper una distancia máxima de 20cm en el eje z se obtiene que:

$$d_{1max} = 20cm + F - D - B \quad (60)$$

2.4 ESLABONES ROTACIONALES

Los Diseños que se muestran a continuación se crean de manera iterativa con el software inventor. Se realizan diseños y dependiendo a los resultados calculados mediante el análisis por elemento finitos, se rediseña la pieza hasta obtener un estado de esfuerzos que genere un factor de seguridad a la fatiga mayor o igual a 2. Esto se realiza de esta manera para disminuir el tiempo de creación del robot. Por lo que a continuación se presentan las piezas y se calcula el factor de seguridad que poseen.

Para el eslabón 4 de la ilustración 21 el diseño que se ha creado es el siguiente:

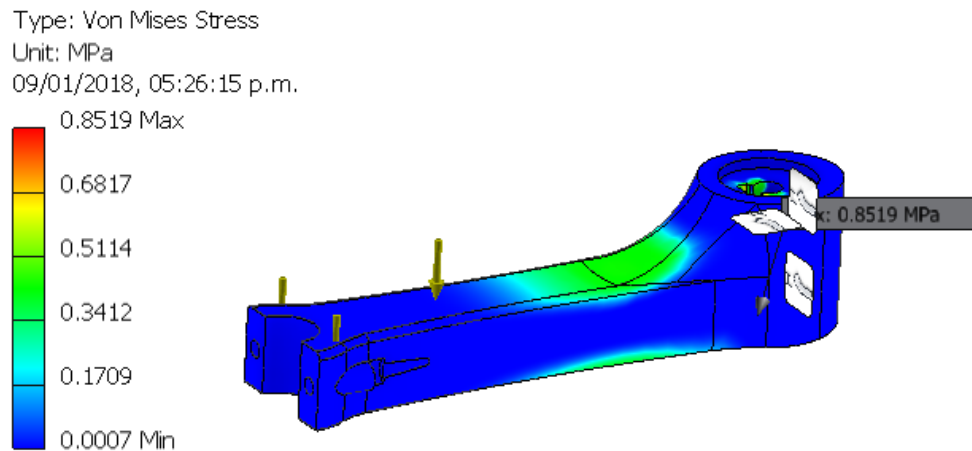


Ilustración 24 Estado de esfuerzos en el eslabón 4

Las fuerzas que se han agregado en el extremo izquierdo del eslabón 4 son de 4.9N. Se desea que la máquina como máximo pueda cargar un peso de 1kg. Aunque el gripper realizado anteriormente no fue calculado para este peso, se espera que mediante otro gripper si se pueda llegar a esta cantidad de fuerza. Aunque este es un eslabón rotacional y puede experimentar una fuerza centrípeta, se ha despreciado ya que el robot no irá a grandes velocidades. Además de esto, se desea que el eslabón sólo soporte una fuerza que cause flexión en el sentido que se aprecia en la ilustración 24. Lo que significa que no se espera que el eslabón experimente una fuerza que impida su rotación. En el análisis por elementos finitos se ha agregado el peso del mismo elemento en los cálculos, por lo que inventor ubica una fuerza cerca en el centro del eslabón para representar esto. Se analiza la falla como si la fuerza fuera repetida, es decir, que el peso de 1kg se aplica totalmente y luego se anula. Según los resultados de inventor se puede verificar que el peso del mismo eslabón no afecta el estado de esfuerzos, prácticamente se puede despreciar y esperar que cuando se retire la carga, no se genere esfuerzo alguno. Por lo que se puede suponer que el esfuerzo medio y alternante Von mises sobre el eslabón, son la mitad del valor calculado por inventor.

Si se toma la resistencia a la fatiga calculada en la ecuación 44, e ignorando el factor de tamaño. Se puede hallar el factor de seguridad a la fatiga de la pieza:

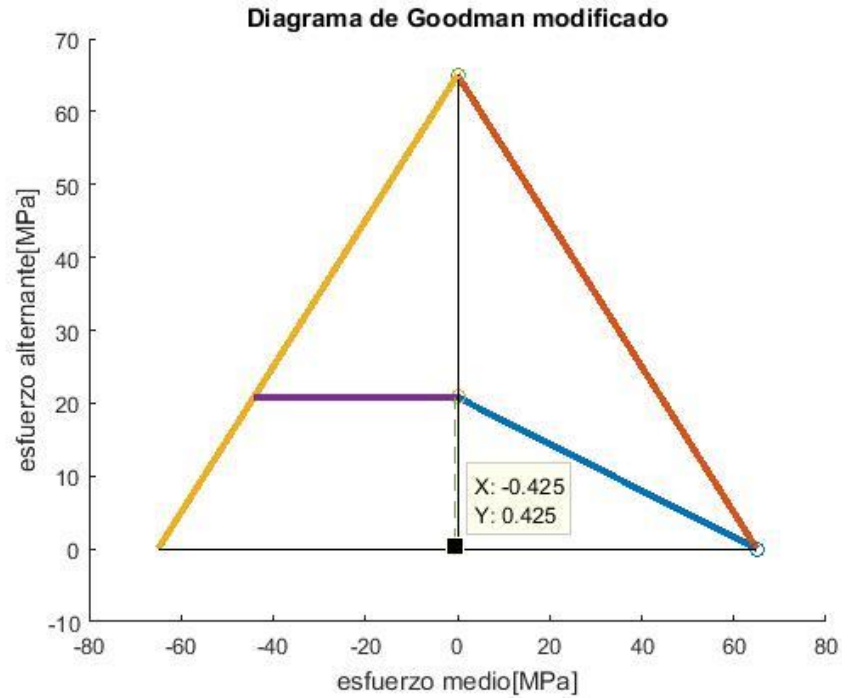


Ilustración 25 Diagrama de Goodman para el eslabón de la ilustración 24.

El resultado es un factor de seguridad de 48.9. Se ha agregado el esfuerzo medio con un valor negativo, ya que en la ilustración 24 se puede ver que el esfuerzo máximo se encuentra en una región que experimenta compresión.

El eslabón 4 se sostiene mediante una varilla lisa de acero que posee un diámetro de $\frac{5}{16}$ pulgadas. Y unos tornillos ISO con un diámetro de 4mm. La ilustración 26 muestra esto:

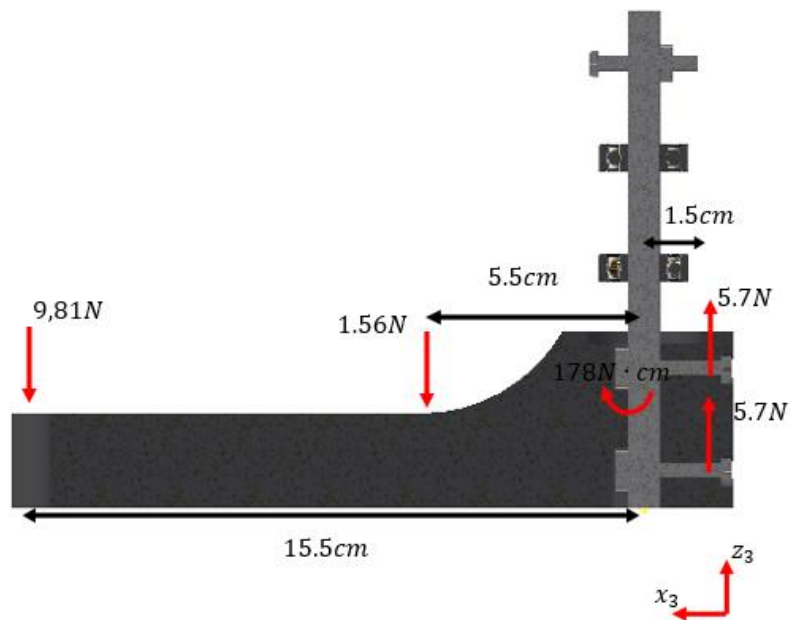


Ilustración 26 Diagrama de cuerpo libre para carga máxima en eslabón 4.

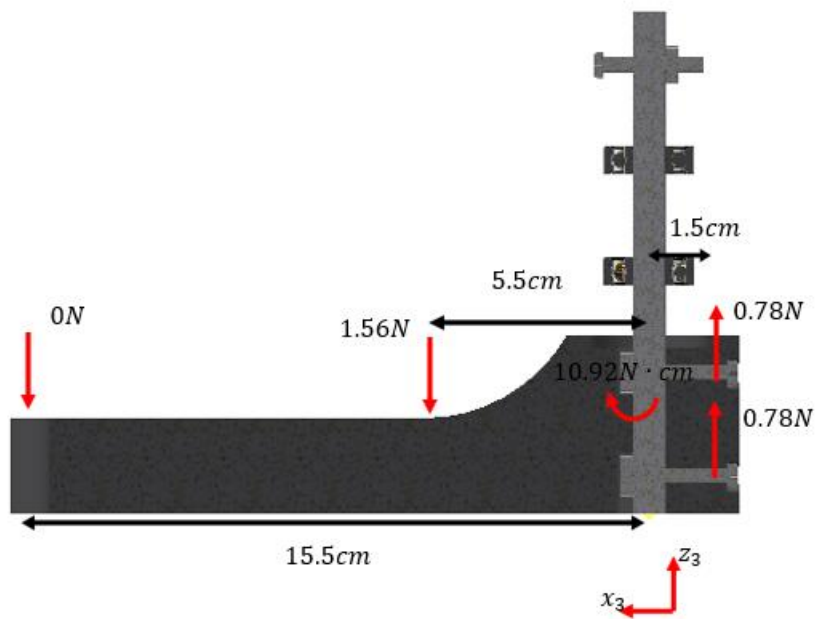


Ilustración 27 Diagrama de cuerpo libre para carga mínima en eslabón 4.

La varilla lisa impide la rotación del eje mientras que los tornillos su traslación. Se ha omitido el torque que transmite el eje ya que, como se dijo anteriormente, este es despreciable. Esto

significa que tanto el eje como los tornillos se tratan como vigas. La fuerza de 1.56N es el peso del eslabón.

Todos los ejes y tornillos usados son hechos de acero y se les debe hallar la resistencia a la fatiga para determinar el factor de seguridad. Se sigue el procedimiento de la referencia (12) para hallar la gráfica S-N para un acero. El esfuerzo del acero para el esfuerzo de ciclo alto, cuando se encuentra a flexión, es:

$$S_m = 0.9 \cdot S_{ut} = 0.9 \cdot (392MPa) = 358MPa \quad (61)$$

Se ha utilizado la resistencia última que indica el proveedor para un acero SAE/AISI: 1020. Todas las varillas y tornillos que se encuentran en la máquina se están cargados a flexión, por lo que el valor S_m aplica para todos los cálculos siguientes. Para el límite de resistencia a la fatiga corregido se calcula:

$$S_e = C_{carga} C_{tamaño} C_{sup} C_{temp} C_{conf} S_e' \quad (62)$$

$$S_e = 1 \cdot 1 \cdot 0.714 \cdot 1 \cdot 1 \cdot (0.5 \cdot 392MPa) = 139MPa \quad (63)$$

Se ha calculado el factor de superficie para el peor acabado superficial, ya que no se conoce cual es. El límite de resistencia a la fatiga que se acaba de calcular se va a aplicar para las varillas y los tornillos. Como el proveedor de tornillos no indica gran información sobre el material, se opta por hacer esto.

La gráfica S-n queda de la siguiente manera:

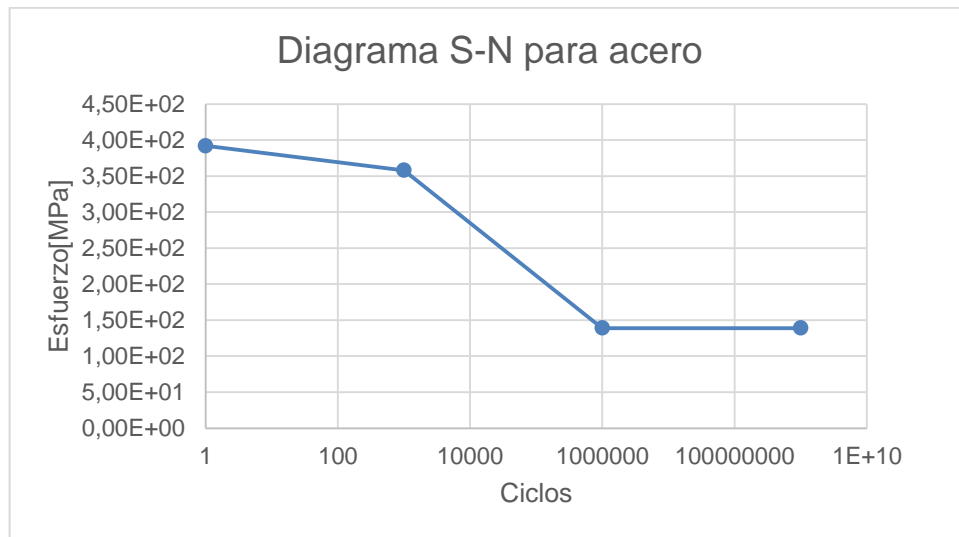


Ilustración 28 Diagrama S-N para acero

El eslabón 4 fue calculado para una cantidad de ciclos igual a $12E3$. Por lo que se calcula el factor de seguridad del acero para estos ciclos.

$$S_{f@12E3} = 279.22MPa \quad (64)$$

El esfuerzo cortante máximo en el tornillo se da en el centro del eje, mientras que el esfuerzo de flexión máximo se da en la posición más alejada respecto al eje. En inventor se crea un eje el cual tiene el diámetro igual al diámetro menor del tornillo, que es de 3.14mm, el estado de esfuerzos el siguiente:

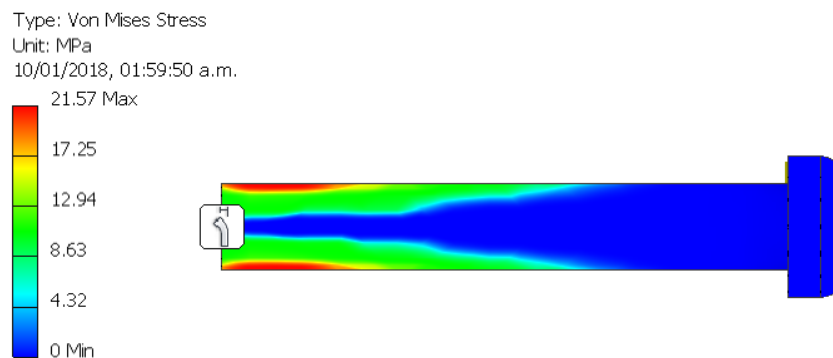


Ilustración 29 Estado de esfuerzos en el tornillo cuando soporta toda la carga.

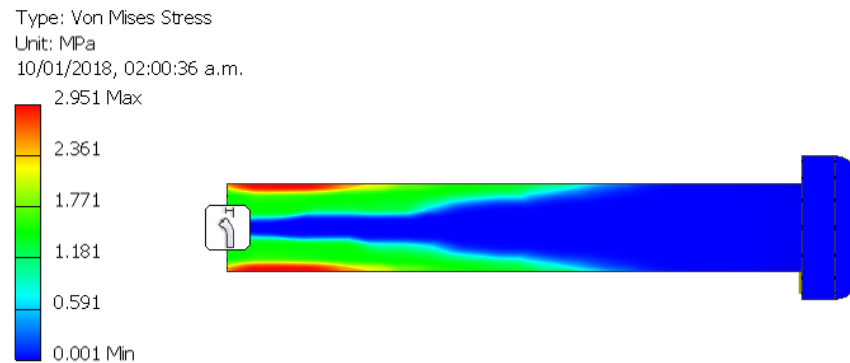


Ilustración 30 Estado de esfuerzos en el tornillo cuando soporta sólo el eslabón 4.

En este caso el tornillo se encuentra sometido a un esfuerzo fluctuante. Cuando soporta el peso del eslabón 4 más el peso que ejerce la masa de 1kg, se encuentra cargado como se ve en la ilustración 29. Mientras que para cuando únicamente soporta al eslabón, la carga es como se ve en la ilustración 30. La parte más crítica del tornillo se encuentra en la sección superior, debido a que se encuentra a tensión. Sabiendo esto, se calcula el diagrama de Goodman, teniendo en cuenta que el esfuerzo a de fluencia es de 304.11MPa. Los esfuerzos Von mises alternante y medio se hallan de los valores máximo y mínimo hallados en las pruebas de las ilustraciones 29 y 30.

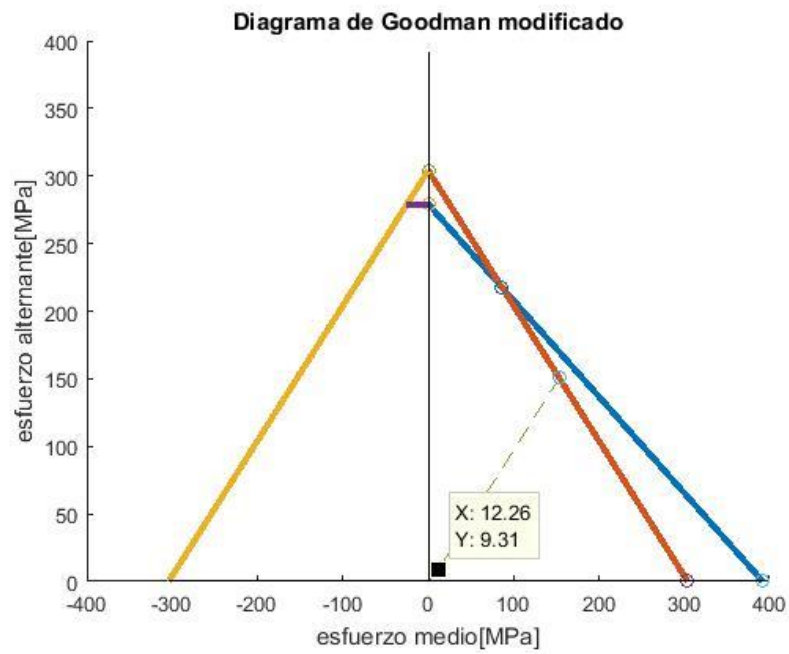


Ilustración 31 Diagrama de Goodman para los tornillos que sostienen al eslabón 4.

El diagrama de Goodman arroja un factor de seguridad igual a 14.

Para el eje se tiene el siguiente diagrama de cuerpo libre:

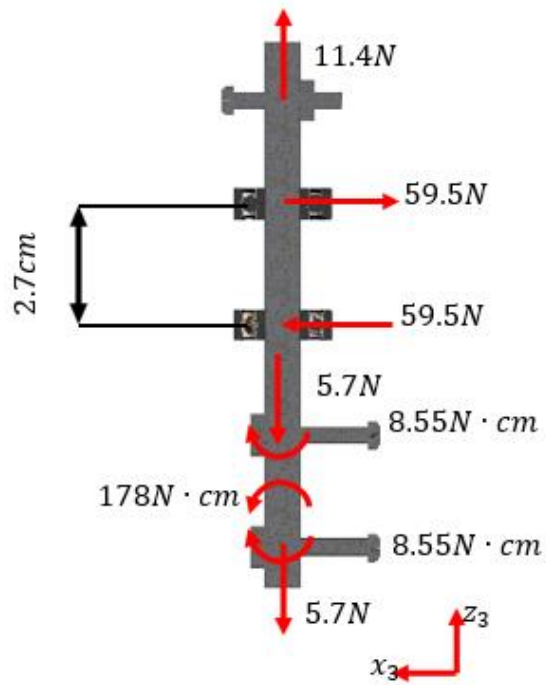


Ilustración 32 Diagrama de cuerpo libre para carga máxima en el eje

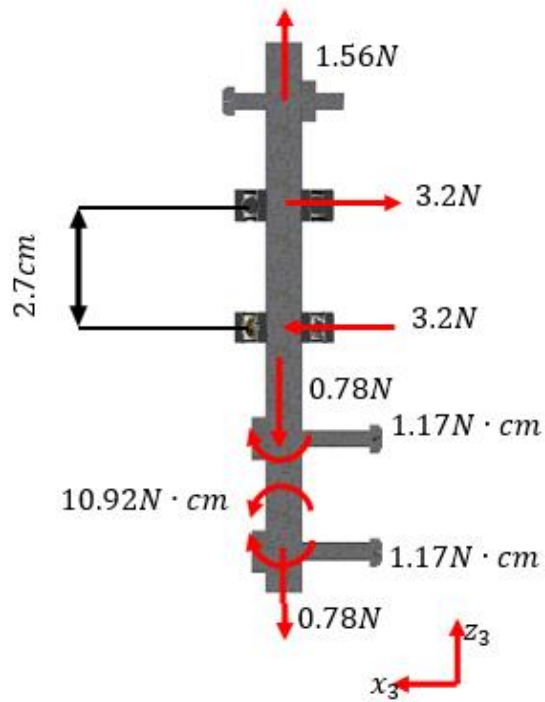


Ilustración 33 Diagrama de cuerpo libre para carga mínima en el eje.

Para el cual se obtienen los siguientes estados de esfuerzos:

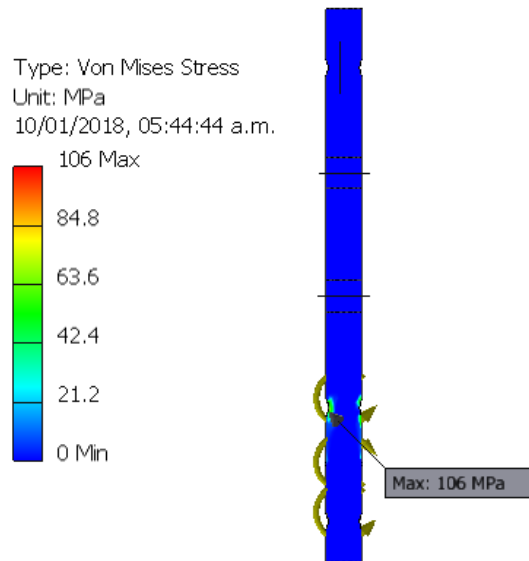


Ilustración 34 Estado de esfuerzos máximo para el eje.

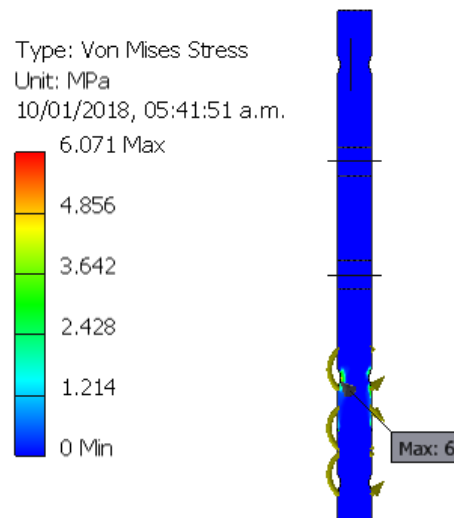


Ilustración 35 Estado de esfuerzos mínimo para el eje.

Implementando estos datos en el diagrama de Goodman se obtiene un factor de seguridad igual a 2.8:

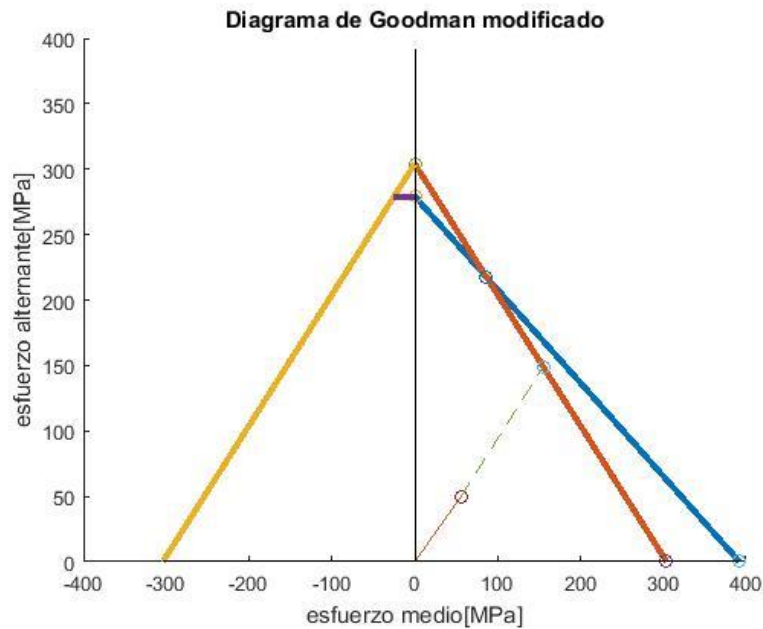


Ilustración 36 Diagrama de Goodman para eje.

En este elemento los esfuerzos críticos se dieron por los concentradores de esfuerzo que se generan en los agujeros por los que pasa el tornillo. De todas maneras, el acero es lo suficientemente resistente como para superar estos concentradores con un buen factor de seguridad.

Para el tornillo superior, el cual está soportando una carga de máxima de 11.4N, se encuentra apoyado en los extremos, es decir que no se encuentra en voladizo. Se espera que la carga se distribuya uniformemente en los extremos de tal manera que haya una fuerza máxima en los extremos de 5.7N. Esta fuerza es la misma con la que se calculó el tornillo de la ilustración 29. Sin embargo, la fuerza ahora se encuentra ubicada a una distancia menor respecto al eje, ya que el tornillo es más corto, por lo que la flexión será menos crítica y por lo tanto el factor de seguridad mayor. Por esta razón no se ha analizado el elemento en inventar.

Los rodamientos que sostienen el eje son de referencia “6082Z” y tienen un factor de carga dinámica igual a 3.45kN, valor el cual es definido para un millón de revoluciones. Por lo que la vida a la fatiga del rodamiento es:

$$L_{10} = \left(\frac{3.45kN}{5.95N} \right)^3 = 194.9 \times 10^{12} \text{ revoluciones} \quad (65)$$

Esta cantidad de revoluciones es más que suficiente para hacer funcionar las conexiones del robot. Como era de esperarse, hasta ahora el elemento que ha representado la mayor probabilidad a fallar es el PLA.

El tornillo superior, en las ilustraciones 32 y 33 está soportado por un rodamiento lineal como se muestra a continuación:



Ilustración 37 soporte del eje mediante un rodamiento axial

El rodamiento axial que se ha implementado es de referencia 51100, para este rodamiento el factor de carga dinámico es de 9.95kN, por lo que la vida a la fatiga para este es:

$$L_{10} = \left(\frac{9.95kN}{11.4N} \right)^3 = 664.89 \times 10^{12} \text{ revoluciones} \quad (66)$$

Al igual que los rodamientos radiales, este tiene una vida útil muy alta. Lo que significa que por lo menos para la revisión mecánica del robot, se espera no tener que hacer cambio de rodamientos.

Para el eslabón 3, de la ilustración 21, se ha generado el siguiente diseño.

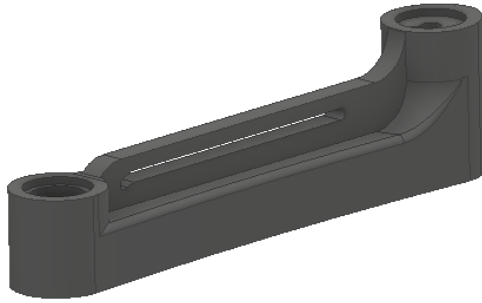


Ilustración 38 CAD de Eslabón 3

El eslabón 3 se encarga de soportar la carga aplicada en el gripper y el peso del eslabón 4 con el eje que lo soporta, ilustración 26. Como el eje se encuentra cargado bajo un esfuerzo fluctuante, este eslabón también lo debe estar. A continuación, se muestran los diagramas de cuerpo libre para este elemento cuando soporta la carga máxima y mínima. Se ha agregado el peso de la varilla, el de un motor paso a paso nema 17 y el del mismo eslabón.

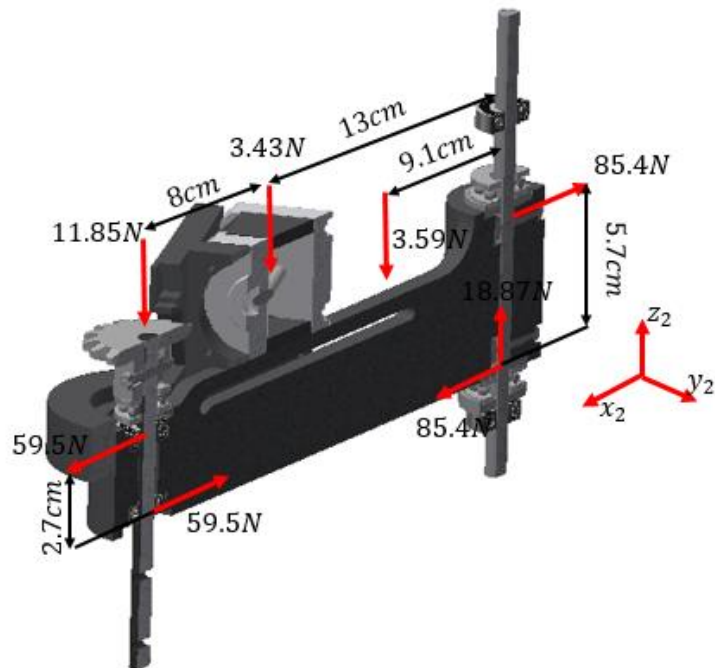


Ilustración 39 Carga máxima sobre el eslabón 3

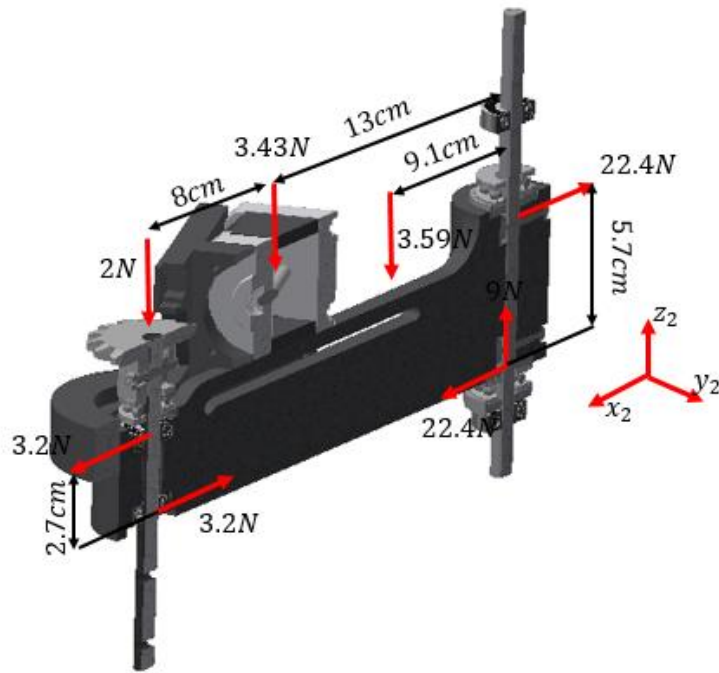


Ilustración 40 Carga mínima sobre el eslabón 3.

Se considera que los tornillos que ajustan el eje no se encuentran experimentando un esfuerzo cortante ya que hay un rodamiento axial soportando todo el eslabón. Por lo que los tornillos sólo se encargan de transmitir el torque para generar una rotación, el cual es despreciable. También se ha agregado un rodamiento axial en la parte superior del eslabón, aunque este no soporta ninguna carga al momento de la operación del robot, su función es limitar el desplazamiento del eslabón ascendentemente para cuando se está ensamblando. También se ha supuesto que la fuerza de reacción que impide la rotación del eslabón se encuentra en los extremos donde entra en contacto con el eje, en el anterior eslabón se supuso que se distribuía uniformemente en el agujero ya que la pieza era más pequeña. Para esta situación de carga, se producen los esfuerzos siguientes:

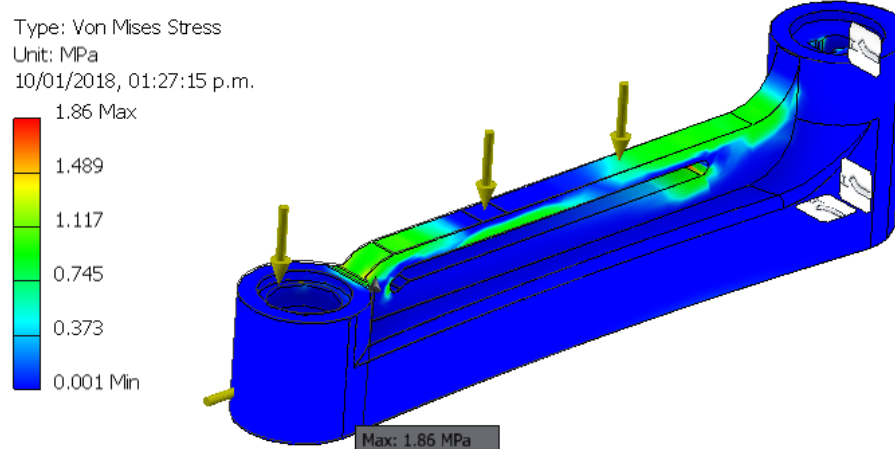


Ilustración 41 Estado de esfuerzos máximo en el eslabón 3

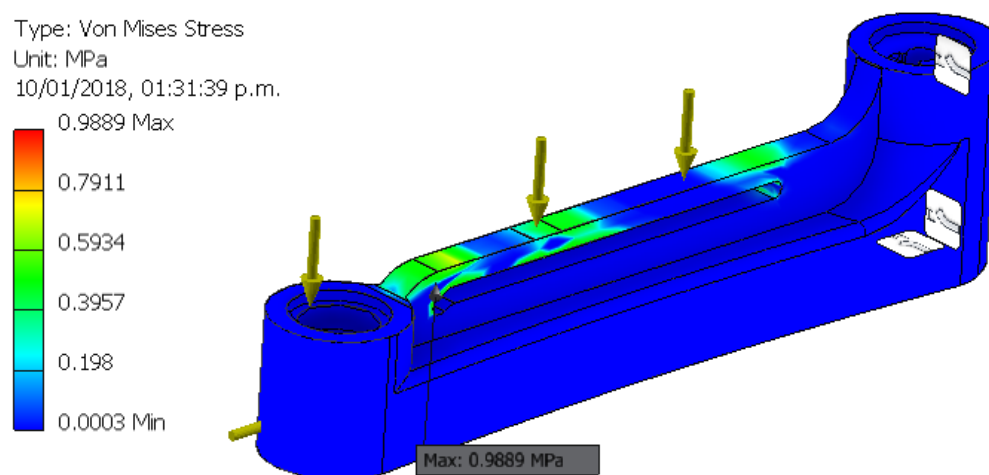


Ilustración 42 Estado de esfuerzos mínimo en el eslabón 3.

En esta situación la sección que siempre experimenta el esfuerzo más alto se encuentra a compresión, por lo que el esfuerzo medio tiene que ser negativo.

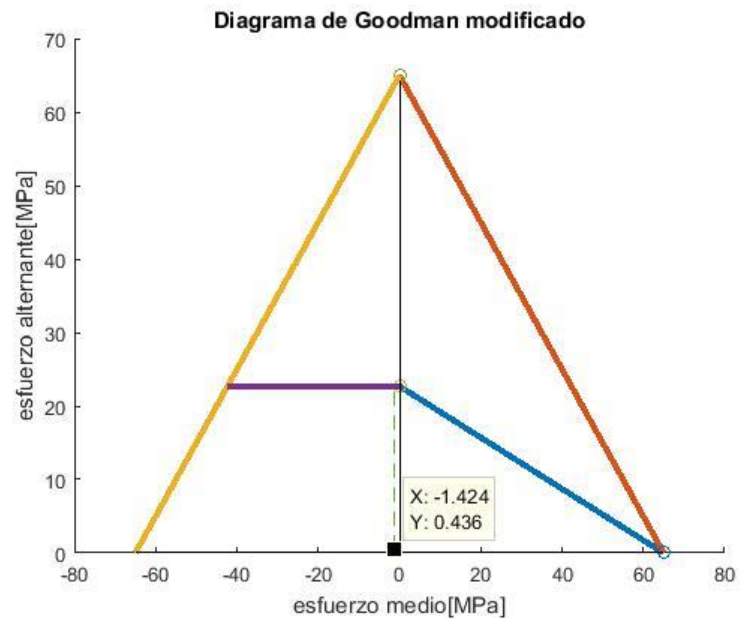


Ilustración 43 Diagrama de Goodman para eslabón 3.

Lo que genera un factor de seguridad igual a 52. Para el rodamiento axial que sostiene al eslabón 3 se tiene que:

$$L_{10} = \left(\frac{9.95 \text{ kN}}{18.87 \text{ N}} \right)^3 = 146.6 \times 10^{12} \text{ revoluciones} \quad (67)$$

Para el eje que soporta al eslabón 3 se realizan los diagramas de cuerpo libre:

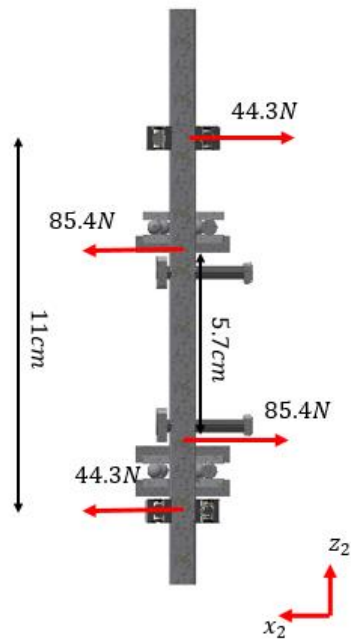


Ilustración 44 Carga máxima sobre eje que soporta al eslabón 3.

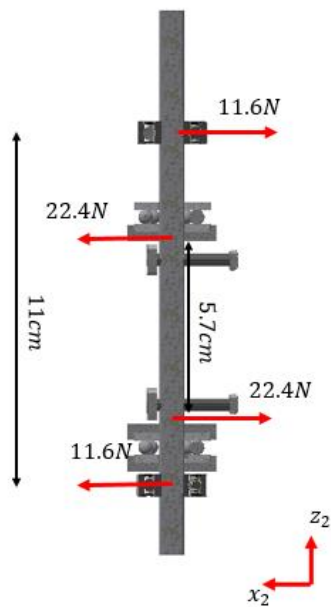


Ilustración 45 Carga mínima sobre el eje que soporta al eslabón 3.

En este caso el eje no soporta absolutamente nada del peso de la estructura, su función es únicamente impedir la rotación sobre el eje y_2 . Esto ocurre gracias al rodamiento axial que se ha

agregado. Por lo que el eje sólo se encuentra sometido a cargas por flexión y cortante. Para esta situación el esfuerzo sobre el eje es:

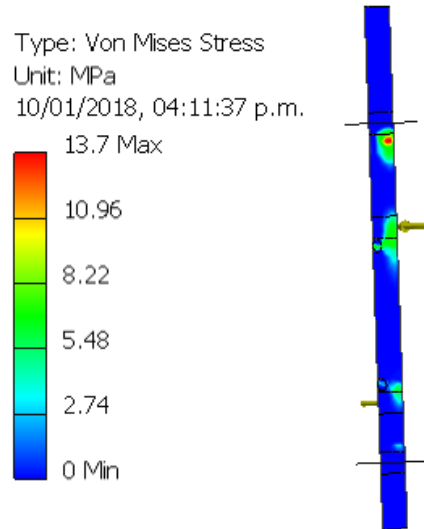


Ilustración 46 Estado de esfuerzos máximo sobre eje que soporta al eslabón 3

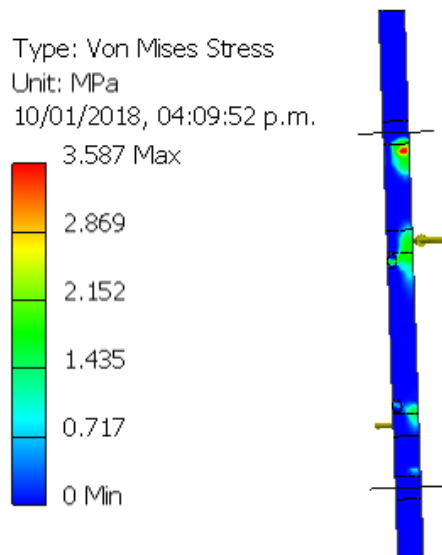


Ilustración 47 Estado de esfuerzos mínimo sobre eje que soporta al eslabón 3

El diagrama de Goodman es:

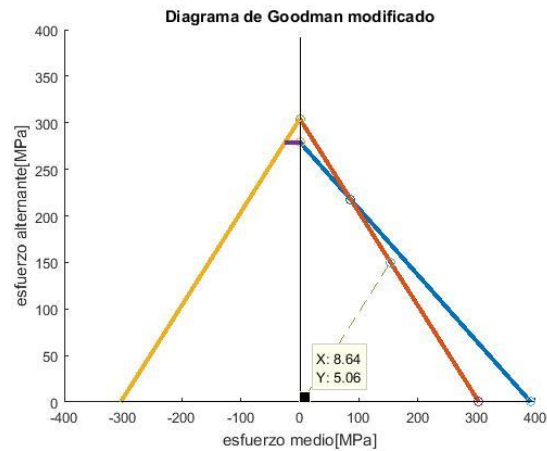


Ilustración 48 Diagrama de Goodman para eje que soporta al eslabón 3

El resultado es un factor de seguridad de 21.

Para los rodamientos radiales que soportan al eslabón 3 se tiene que:

$$L_{10} = \left(\frac{3.45kN}{44.3N} \right)^3 = 472.3 \times 10^9 \text{ revoluciones} \quad (68)$$

La ilustración 49 muestra el ensamble del gripper y los dos eslabones rotacionales que se acaban de calcular.



Ilustración 49 Ensamble del gripper con los dos eslabones rotacionales.

El diseño se ha pensado de tal manera que un estudiante pueda crear una base para el motor que esté usando y acoplarla al eslabón 3. No se ha calculado un toque mínimo que genere un movimiento rotacional por la misma razón por la cual no se calcularon esfuerzos por torsión en los ejes. La máquina está pensada para que la carga sea alzada desde el gripper sin que haya restricción en el movimiento rotacional. Esto significa que se pueden acoplar desde los motores con más bajo torque hasta los de potencia moderada. Los rodamientos son los encargados de soportar toda la carga y facilitar el movimiento rotacional. Como no se espera alguna restricción respecto al torque. Se diseña, arbitrariamente, un engranaje sin fin con una ganancia de 16 y se crea una base que se acopla al eslabón 3 mediante sujetadores, como se aprecia en la ilustración 50

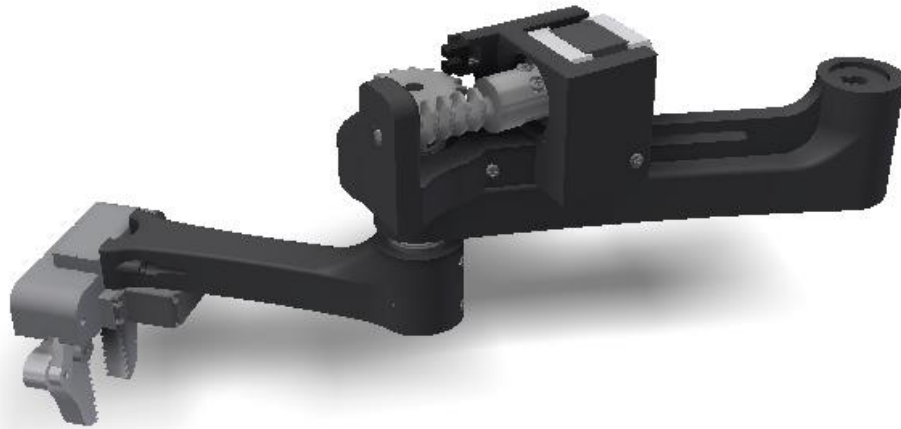


Ilustración 50 Base para motor acoplada en el eslabón 3.

2.5 ESLABÓN PRISMÁTICO Y BASE DEL ROBOT.

Ahora sólo falta calcular los eslabones 2 y 1. En la figura siguiente se puede ver la forma que se le ha dado al eslabón prismático y los elementos de los que se compone. En la ilustración 51 se puede ver que toda la estructura se desliza a través de unas varillas mediante el uso de rodamientos lineales, los cuales son de referencia LM8UU. Mediante una correa se transmite la fuerza al eslabón para trasladarlo y así permitir el desplazamiento del gripper en el eje z. los rodamientos axiales se encargan de impedir un desplazamiento traslacional en el eslabón 3, el cual está conectado mediante la varilla que se ha presentado en la ilustración 44 y 45. Las vigas de MDF se encargan de mantener unidas las piezas que contienen los rodamientos lineales.

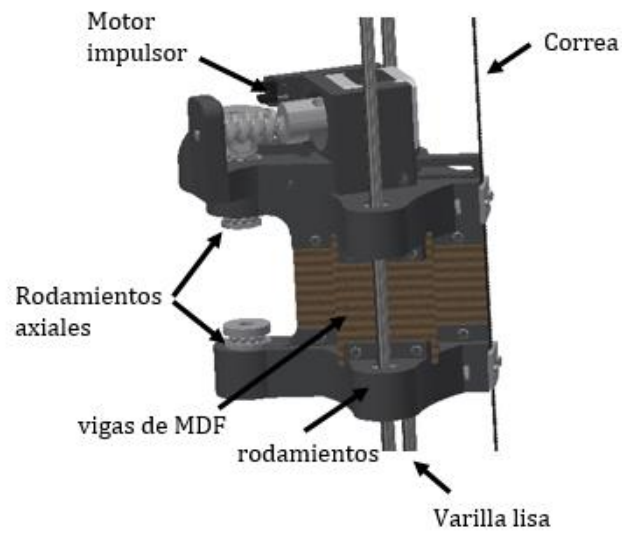


Ilustración 51 Eslabón prismático.

De las ilustraciones 39, 40 ,44 y 45 se conocen las fuerzas que se deben transmitir al eslabón prismático. Si se utilizan dichas fuerzas en el diseño se pueden hallar los siguientes diagramas de cuerpo libre:

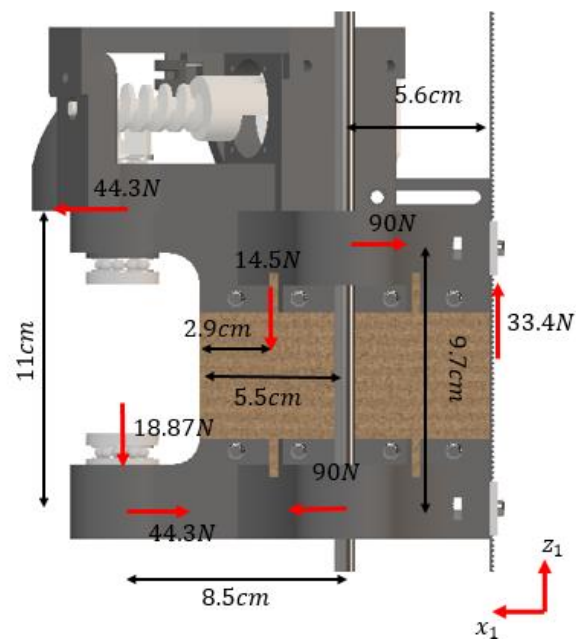


Ilustración 52 Carga máximo sobre eslabón 2.

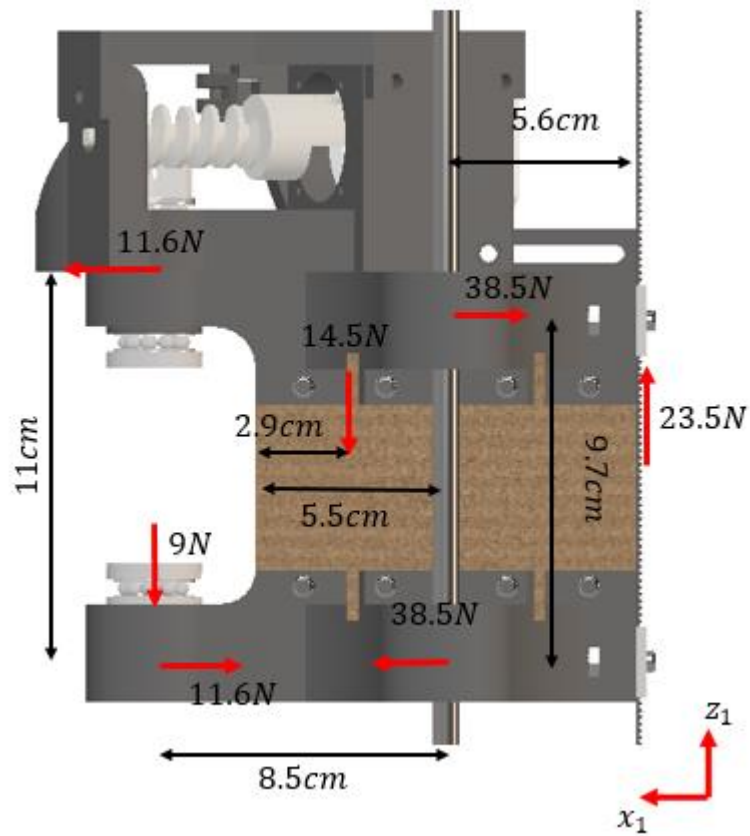


Ilustración 53 Carga mínima sobre eslabón 2.

La fuerza de 14.5N es el peso del eslabón prismático y se ha ubicado en el centro de gravedad que indica inventor. Las fuerzas que se encuentran ubicadas en los rodamientos lineales deben dividirse en dos ya que se poseen dos rodamientos para las dos varillas en la parte superior e inferior. Para estas cargas se realiza el análisis de esfuerzos mediante inventor y se generan los siguientes resultados. Los resultados de esfuerzos sólo se presentan para la pieza inferior ya que esta es la que se esfuerza más, según inventor. El resultado es:

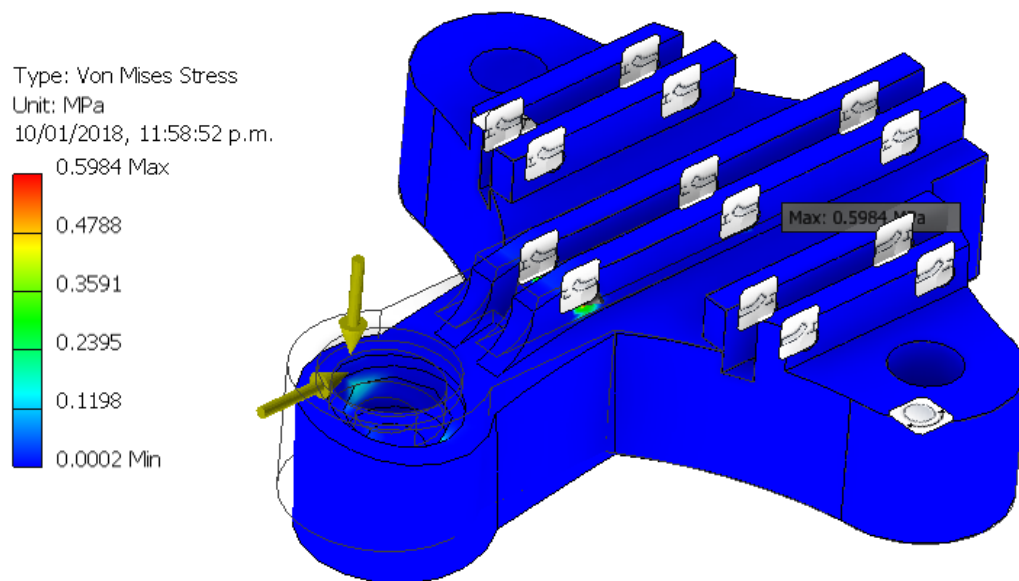


Ilustración 54 mayor estado de esfuerzos en pieza más crítica del eslabón primático.

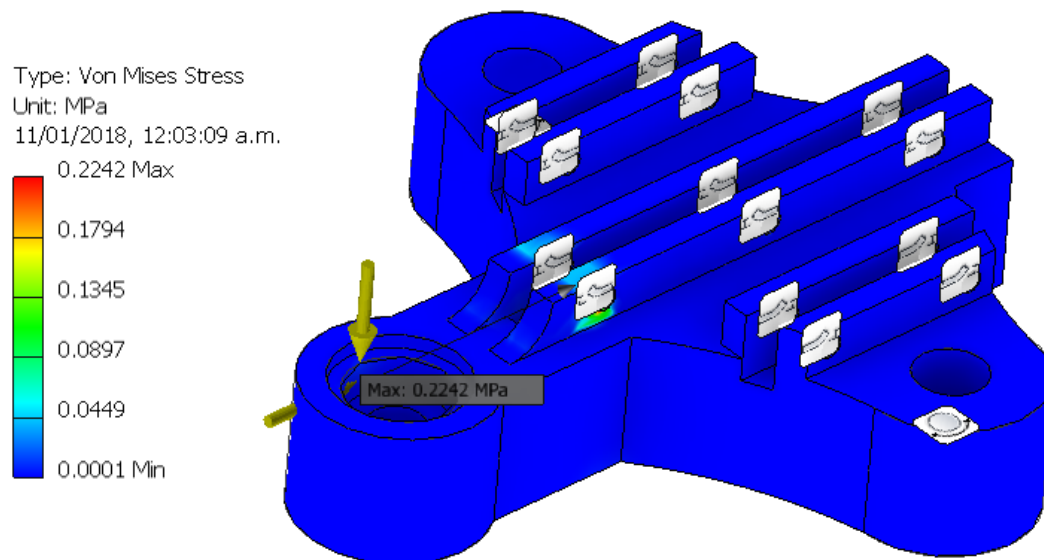


Ilustración 55 Menor estado de esfuerzos en la pieza más crítica del eslabón prismático.

El diagrama de Goodman es:

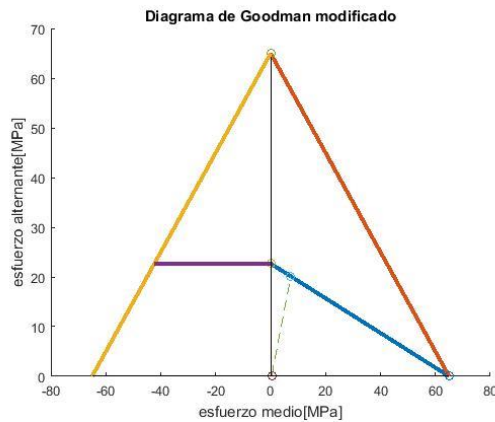


Ilustración 56 Diagrama de Goodman para en la pieza más crítica del eslabón prismático

Las piezas que conforman el eslabón prismático poseen unas dimensiones que provocan que los esfuerzos sean casi nulos. Aunque la pieza a la cual se le calculó el diagrama de Goodman era la más crítica, esta posee un factor de seguridad igual a 48.

Los rodamientos LM8UU se encuentran cargados máximo a 45N, debido a que los 90N se deben repartir en dos rodamientos. El factor de carga dinámica para este rodamiento es de 274N. El cálculo para la vida útil del rodamiento se hace igual que para los rodamientos radiales y axiales, excepto que el resultado se debe multiplicar por 50 (19), generando el dato en kilómetros. Según lo anterior este rodamiento puede soportar un desplazamiento de 11287.1km.

Para las varillas que se encuentran soportando al eslabón prismático, de la ilustración 52 y 53,

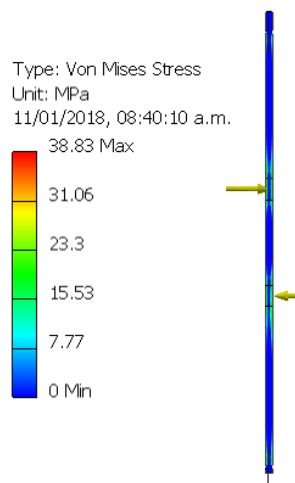


Ilustración 57 Mayor estado de esfuerzos en varilla que soporta al eslabón prismático.

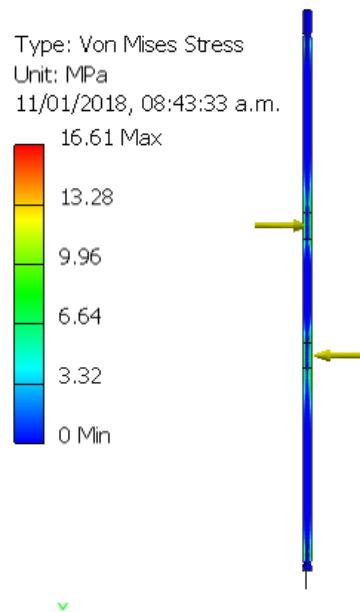


Ilustración 58 Menor estado de esfuerzos en varilla que soporta al eslabón prismático.

El Diagrama de Goodman se muestra a continuación, y con este se obtiene un factor de seguridad de 7.2

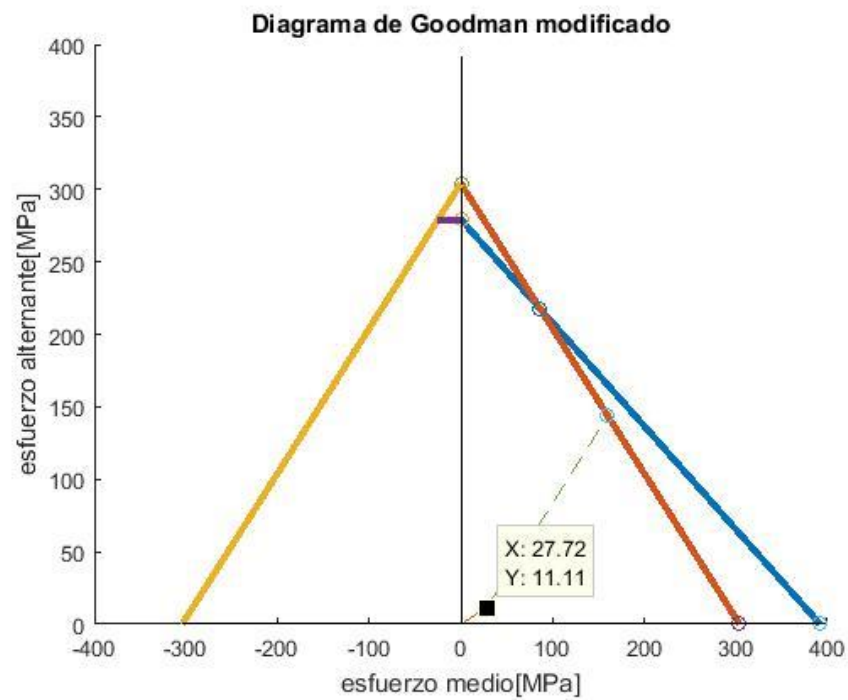


Ilustración 59 Diagrama de Goodman para varilla que soporta al eslabón prismático.

El mecanismo que permite el ascenso del brazo se ve a continuación:

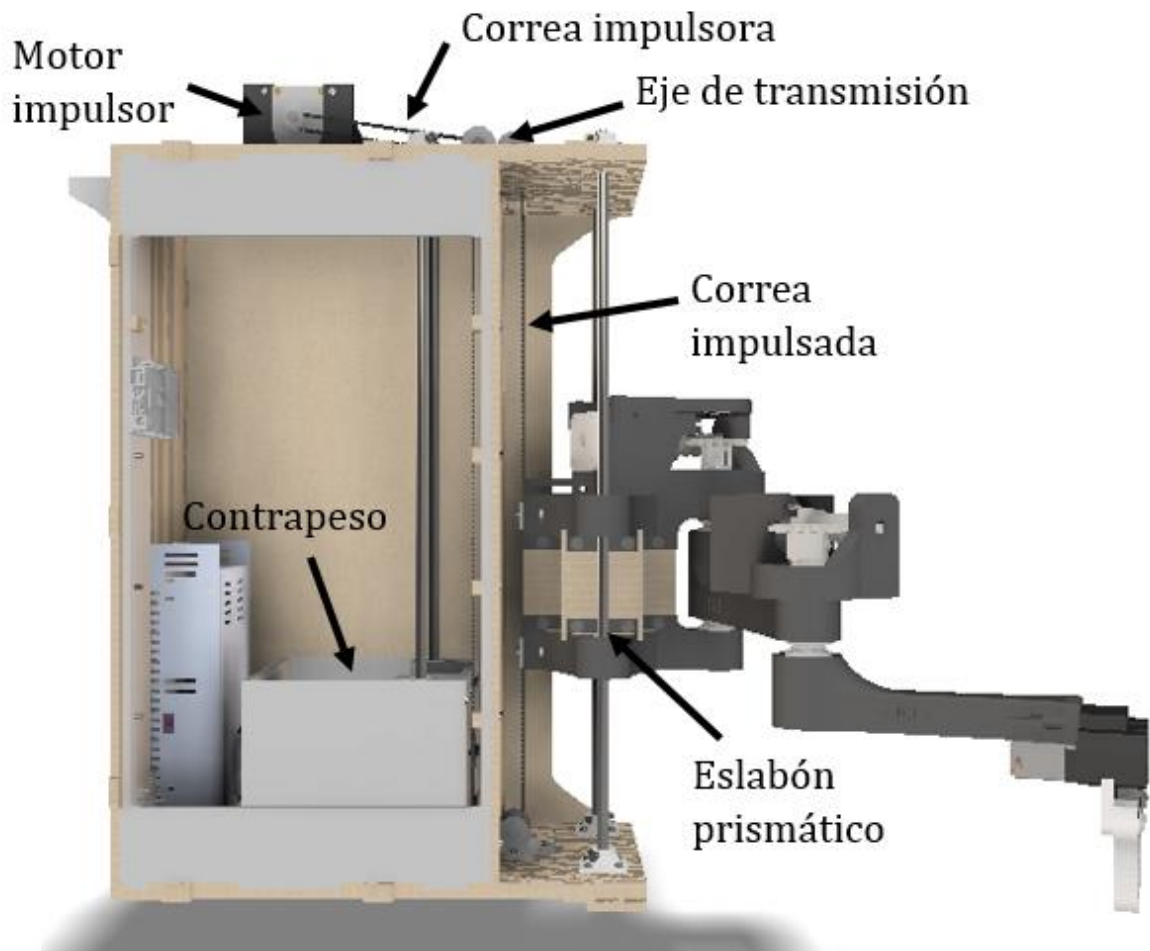


Ilustración 60 Mecanismo para el movimiento en el eje z

Este se compone de un contrapeso y una correa que transmite la fuerza hacia el eslabón prismático. Las varillas de la sección izquierda no se calculan debido a que la flexión que experimentan es mucho menor que las de la sección derecha. El contrapeso debe tener el mismo peso que el del brazo para disminuir el torque mínimo del motor, por lo que debe pesar 23.5N, como se ve en la ilustración 53. Este peso equivale a colocar una masa de 2.4kg.

A continuación, se presenta el diagrama de cuerpo libre del eje de transmisión cuando está soportando el peso de 1kg en la punta del gripper.

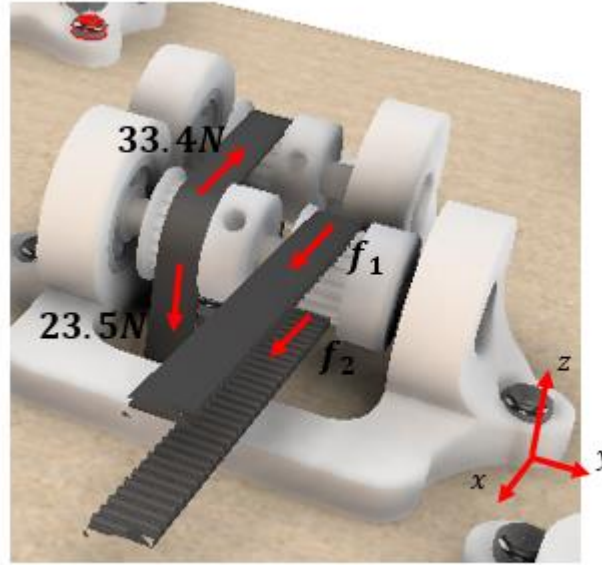


Ilustración 61 Sistema de transmisión por banda de sincronización

Todas las poleas tienen el mismo diámetro de paso, ya que no se desea aumentar el torque del motor o disminuirlo, por lo que todas las fuerzas tienen el mismo brazo de palanca. La fuerza de 33.4N equivale al peso que soporta la correa en la figura 52. La fuerza de 23.5N equivale al peso que ejerce el contrapeso de la figura 60. Anteriormente se había comentado que se desea implementar elementos que sean muy comerciales, y como en la mayoría de las tiendas electrónicas se puede conseguir correas de sincronización S2M con sus respectivas poleas, se opta por escoger este perfil de diente. Las poleas que se consiguen para este paso tienen 20 dientes. Los cálculos que se presentan a continuación se basan en las ecuaciones presentadas por el proveedor de correas de la referencia (20)

El diámetro de paso para esta polea es:

$$PD = pitch \cdot \frac{\text{numero_dientes}}{\pi} = 2mm \cdot \frac{20}{\pi} = 12.7mm \quad (69)$$

Si se evalúa el estado de equilibrio alrededor del eje “y” para la ilustración 61 se tiene que:

$$-33.4N \cdot \frac{PD}{2} + 23.5N \cdot \frac{PD}{2} + f_1 \cdot \frac{PD}{2} - f_2 \cdot \frac{PD}{2} = 0 \quad (70)$$

$$f_1 \cdot \frac{PD}{2} - f_2 \cdot \frac{PD}{2} = T_M = 33.4N \cdot \frac{PD}{2} - 23.5N \cdot \frac{PD}{2} = 6.28N \cdot cm = 0.64kgf \cdot cm \quad (71)$$

La variable T_M representa el torque que debe transmitir el motor para por lo menos mantener estático el gripper en el eje z.

Se desea como máximo el gripper se desplace 20cm en 3 segundos, por lo que la velocidad lineal es de $6.66 \frac{cm}{s}$. Para esta velocidad lineal en la correa se alcanza una velocidad angular de:

$$\omega = \frac{6.66 \frac{cm}{s}}{\frac{PD}{2}} = 5.24 \frac{rad}{s} = 50RPM \quad (72)$$

Mediante las tablas que se ofrecen en la referencia (20) se obtiene un factor de servicio igual a:

$$K_s = 1.2 \quad (73)$$

Con el torque y velocidad angular del motor se calcula la potencia transmitida:

$$P_M = \omega \cdot T_M = 0.329W \quad (74)$$

La potencia de diseño es:

$$P_D = K_s \cdot P_M = 1.2 \cdot 0.329W = 0.394W \quad (75)$$

Con la velocidad angular y la potencia de diseño se puede observar que tan bueno es el perfil del diente para esta aplicación.

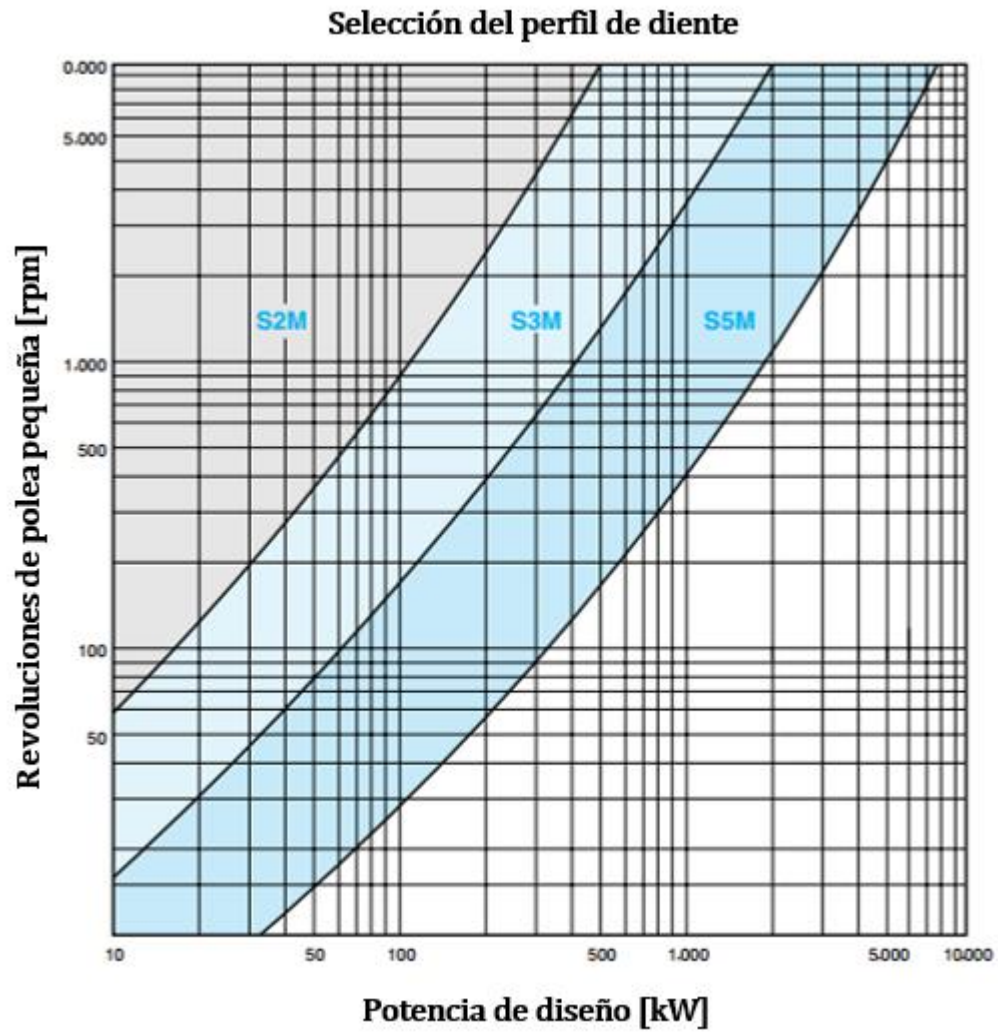


Ilustración 62 Gráficas para selección del perfil del diente para correas sincrónicas (20)

Se puede observar que la potencia y la velocidad obtenida en las ecuaciones 72 y 74 están muy por debajo de los valores para los cuales se utiliza esta correa. Sin embargo, esto no significa que su funcionamiento no va a ser el correcto.

Para obtener el ancho de la correa se utiliza la siguiente fórmula:

$$B_{W'} = \frac{P_D}{P_s \cdot K_m} \cdot W_p = \frac{0.394W}{2kW \cdot 1} \cdot 4mm = 7.88 \times 10^{-4} mm \quad (76)$$

La variable P_s es la clasificación de potencia básica, la cual se halla en tablas, K_m es un factor que toma en cuenta la cantidad de dientes de la polea que se conectan a la correa, el cual tiene un valor de 1 si hay más de 6 dientes. W_p es el ancho estándar para la correa. El resultado de la ecuación 76 indica que cualquier ancho que se tenga comercial va a funcionar para esta aplicación.

Según el fabricante la tensión inicial para las correas debe ser:

Tabla 3 Tensión inicial de correa Unidad en N (20)

Perfil de diente	Ancho de correa[mm]	4	6	10	15	25
S2M	mínimo	5.88	9.34	16.7		
	máximo	7.85	12.5	22.3		
S3M	mínimo	12.4	19.6	35.1	55.7	
	máximo	16.7	26.5	47.4	75.3	
S5M	mínimo			57.9	91.9	164
	máximo			77.5	123	220

Para este tipo de correa se implementa una tensión inicial de 5.88N. Por lo que las fuerzas f_1 y f_2 de la ilustración 61 deben sumar 5.88N.

$$f_1 + f_2 = 5.88N \quad (77)$$

De la ecuación 71 se obtiene que:

$$f_1 - f_2 = \frac{6.28N \cdot cm}{\frac{PD}{2}} = 4.94N \quad (78)$$

Si se resuelve el sistema de ecuaciones 77 y 78, se tiene que:

$$f_1 = 5.41N \quad (79)$$

$$f_2 = 0.47N$$

(80)

El cálculo de los factores de seguridad se culmina hasta esta parte. Se considera que todos los demás elementos no están soportando un esfuerzo crítico.

Los cálculos anteriores revelan que el elemento más probable a fallar es el Gripper, por la gran fuerza de agarre que se le ha dado con el servomotor MG995. Esto significa que únicamente se espera revisar el gripper para una cantidad de ciclos de 12E3.

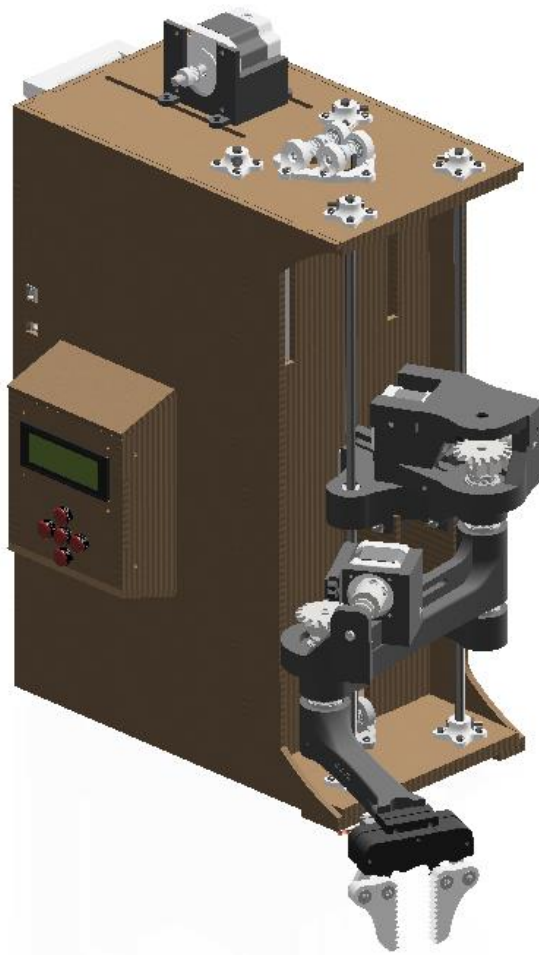


Ilustración 63 Diseño final de la estructura.

3. DISEÑO E IMPLEMENTACION DE CIRCUITOS IMPRESOS Y ETAPAS DE POTENCIA

3.1 RESUMEN DEL CAPÍTULO

Manteniendo como base de diseño la idea de implementar un robot Scara cuya estructura sea capaz de admitir cambios que aumenten la capacidad de carga o precisión del movimiento, se hace indispensable crear diseños eléctricos que soporten un amplio rango de motores paso a paso y motorreductores. Lo que significa que el diseño eléctrico debe producir una tarjeta de control que admita el acople de los dos tipos de motores teniendo en cuenta que el límite máximo de potencia y voltaje se debe fijar respecto a los rangos más comunes manejados en el comercio para la línea estudiantil.

Cabe resaltar la gran ventaja que posee esta estructura al ser prácticamente independiente del motor a ser implementado. La estructura misma ha reducido en gran medida la magnitud del torque que produce un movimiento inminente en cualquiera de los 3 grados de libertad, lo que le permite al estudiante preocuparse únicamente por la precisión y velocidad que desea en el movimiento del robot.

En este apartado se inicia explicando el diseño de fuentes lineales (convertidor CC-CC) (21) (22) que permiten alimentar con gran seguridad circuitos que demanden grandes niveles de corriente y potencia, posteriormente se explica la configuración del circuito de control y se finaliza con el diseño del driver que manipula todos los motores de la estructura.

3.2 FUENTES LINEALES

Es una las fuentes más sencillas que se puede construir y aunque no es la más adecuada, debido a la baja eficiencia que maneja, es capaz de regular un voltaje DC para proporcionar los niveles necesarios en los circuitos que se muestran en los diseños posteriores. La desventaja de este circuito se encuentra en los niveles de potencia que pueden llegar a consumir los transistores, ya que se encuentran actuando en su zona lineal. Por lo que es necesario tener presente en todo momento éste dato ya que es la principal causa que producirá el daño en la fuente lineal, dato que no es tan importante en los convertidores conmutados ya que el transistor únicamente trabaja en las zonas de saturación y corte. A continuación, se presentan los circuitos más básicos para una fuente lineal:

3.2.1 Fuente lineal controlada por corriente

Su configuración se puede ver en la ilustración 64, este circuito saca ventaja de la relación existente entre la corriente del colector respecto a la de la base. Básicamente el transistor toma el papel de una fuente de corriente imprimiendo beta veces la corriente impuesta en la base. La corriente de salida y el voltaje impreso se dan de la siguiente manera:

$$i_1 \times \beta = i_{R3} \quad (81)$$

$$10mA \times 43.8 = 438.24\mu A \quad (82)$$

$$V_{R3} = i_{r3} \times r_3 = 438\mu A \times 10k\Omega = 4.38v \quad (83)$$

Este circuito depende absolutamente del valor que posee la ganancia de la base, la cual depende de muchas condiciones, por lo que lo hace inseguro e incapaz de mantener una referencia fija. Además de esto se puede notar que la carga con la que se ha probado la fuente lineal es de tipo resistiva, lo que revela que para cargas inductivas o capacitivas el resultado puede ser totalmente diferente. Lo anterior significa que ésta es una de las peores fuentes lineales que se podría implementar en los diseños que controlarán el manejo de los motores y la interfaz de

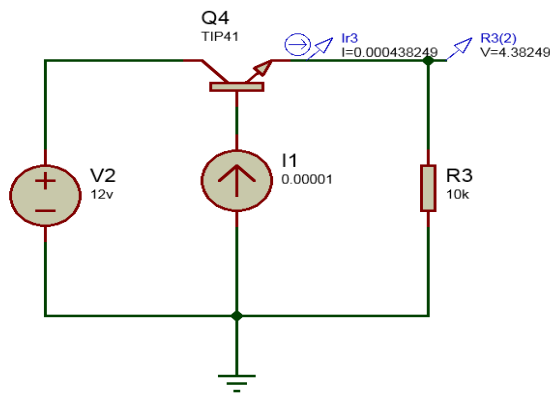


Ilustración 64. Fuente lineal controlada por corriente
comunicación entre la máquina y el estudiante.

3.2.2 Fuente lineal controlada por voltaje

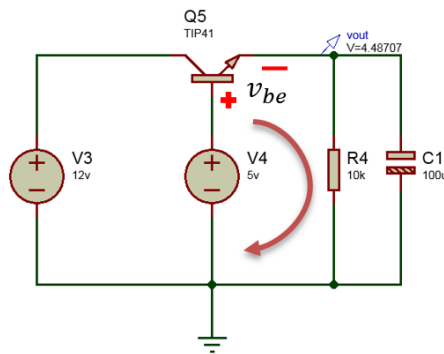


Ilustración 65. Fuente lineal controlada por voltaje

El circuito de la ilustración 65 contiene una fuente de voltaje en la base del transistor la cual se encarga de producir el voltaje deseado en la carga. Como se puede ver este circuito no depende

de la naturaleza de la carga, es decir que el efecto producido en la salida será el mismo tanto para cargas resistivas como capacitivas o inductivas. La fórmula que predice el comportamiento de dicha fuente lineal es la siguiente:

$$V_4 - v_{be} = 5v - 0.51v = 4.487v = v_{out} \quad (84)$$

Una vez más se posee una configuración que depende de las propiedades del transistor. Aunque los resultados son mucho mejores, a mayores corrientes el voltaje de base-emisor puede tomar valores más altos. Además de esto es importante mantener el voltaje de base bastante controlado para que los errores no sean más críticos.

3.2.3 Fuente lineal controlada por amplificador operacional

Hasta el momento ninguno de los circuitos mostrados mide de alguna manera la salida para compararla con una referencia con el fin de reducir el error. La fuente lineal controlada por amplificador, aunque no es un controlador el cual calcula el error de la salida respecto a la referencia para multiplicarla con una ganancia, este logra hacer el mismo efecto, pero de una manera más sencilla.

Para el caso de un amplificador operacional ideal la corriente en la entrada inversora y no inversora tiene una magnitud igual a cero y los voltajes para estas mismas terminales son iguales. Suponiendo que el amplificador operacional se encuentra representado de esta manera se procede a hacer los cálculos. La variable v_- es la entrada inversora mientras que la variable v_+ la entrada no inversora.

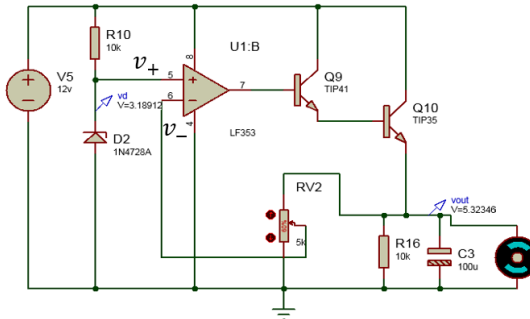


Ilustración 66. Fuente lineal controlada por amplificador

$$v_d = v_+ = v_- = 3.2v \quad (85)$$

Como la entrada inversora no consume corriente, se puede decir que el voltaje que llega a esta terminal es el equivalente al divisor de voltaje que genera el potenciómetro, por lo que simplemente se usará una variable llamada porcentaje.

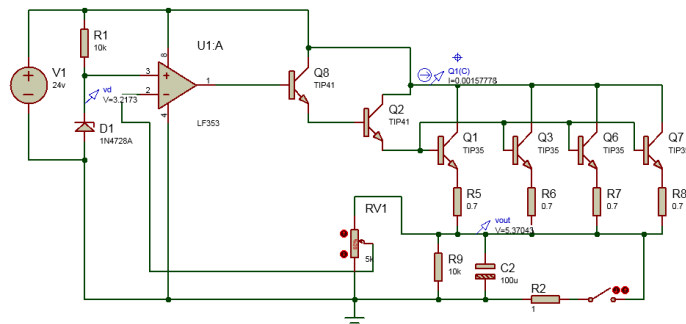
$$v_- = v_{out} \cdot \text{porcentaje} \quad (86)$$

$$v_{out} = \frac{v_-}{\text{porcentaje}} = \frac{3.2v}{0.6} = 5.33v \quad (87)$$

El resultado revela que en ningún momento se tiene en cuenta las características de los transistores implementados. Cuando el voltaje leído en la terminal inversora es diferente al de la terminal no inversora, el amplificador operacional imprime un nivel de voltaje más grande en su salida hasta eliminar el error detectado. Al momento de implementar dicha configuración es necesario calcular la potencia consumida por el transistor y la corriente entregada por el amplificador operacional para un correcto funcionamiento.

En algunos casos la configuración en cascada de los transistores no es suficiente para alimentar un circuito implementando transistores convencionales. La potencia puede llegar a valores críticos que sólo se puede satisfacer con transistores de alta potencia, los cuales son más costosos. Además de esto es necesario tener presente que los transistores que adquieren la mayoría de los estudiantes se les clasifica como genéricos, lo que da a entender que no poseen las mismas características que un transistor original, aumentando la probabilidad falla.

Para evitar la necesidad de adquirir un transistor con más potencia se propone el siguiente circuito, el cual reparte la potencia requerida en varios transistores. Las ilustraciones 67 y 68 muestran dicha configuración.



*Ilustración 67. Fuente lineal controlada por amplificador con etapa de potencia robusta.
(Sin alimentar carga de 1 Ohm)*

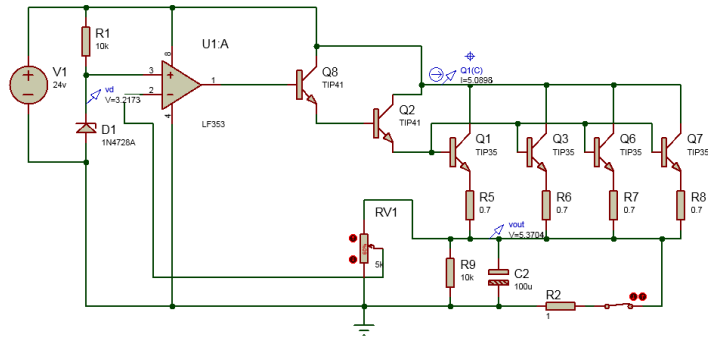


Ilustración 68. Fuente lineal por amplificador con etapa de potencia robusta.
(Alimentando carga de 1 ohm)

Al igual que en análisis anterior el cálculo para el voltaje de salida sigue siendo el mismo, ya que la salida no depende del tipo o cantidad de transistores. La resistencia de 0.7ohm es esencial para activar los transistores al mismo tiempo y así evitar que uno de ellos sea el que entregue toda la corriente. Esto ocurre debido a las pequeñas diferencias que existe entre los transistores respecto a la ganancia de la base. Sin la resistencia, el transistor con mayor ganancia comienza a consumir mayor potencia generando un aumento de su temperatura e inevitablemente una variación en su ganancia, haciendo que éste termine alimentando todo el circuito al superar considerablemente la ganancia de los demás.

la resistencia de 1 ohm a 5v debe consumir 5A. Por lo tanto, si todos los transistores TIP3C son iguales, la corriente de colector en cada uno de ellos es:

$$I_{cq1} = \frac{5A}{4} = 1.25A \quad (88)$$

Por lo que la potencia consumida por los transistores TIP35C es:

$$P_{q1} = 1.25 \times (24v - 5v) = 23.7W \quad (89)$$

La potencia consumida por la carga (resistencia de 1 ohm) es:

$$P_{R2} = \frac{(5v)^2}{1\Omega} = 25W \quad (90)$$

Lo anterior revela que los transistores consumen el 79.13% de la potencia mientras que la carga el 20.86%. Además de eso se puede notar que de haber tenido un único transistor para entregar los 5.37A la potencia de este habría sido de 94W, valor que se acerca aún más al límite de 125W del transistor “TIP 35C”.

El anterior circuito permite expandir su configuración para elaborar una fuente lineal cuya referencia sea controlada por un microcontrolador (mediante un PWM), en vez de un potenciómetro. A continuación, se presenta dicha configuración.

3.2.4 Fuente lineal controlada por señal PWM

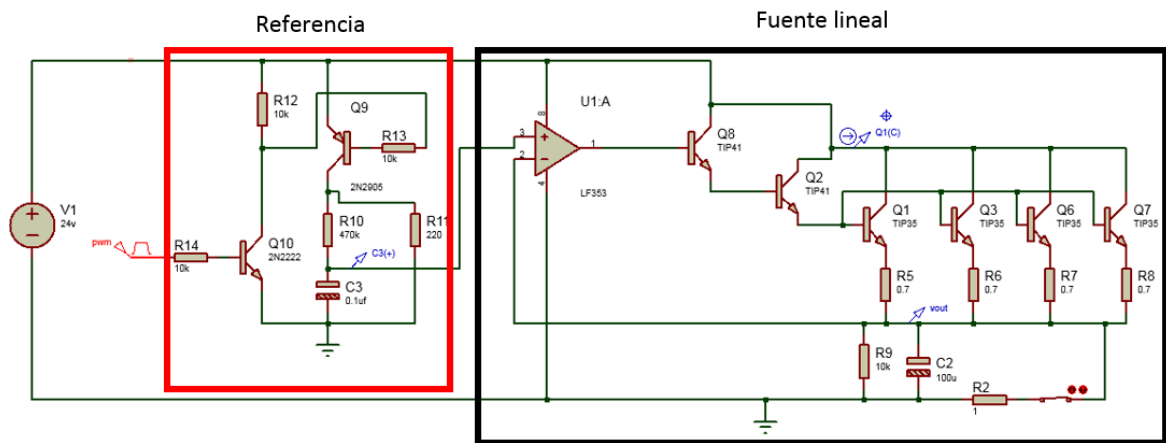


Ilustración 69. Fuente lineal controlada por PWM.

En la sección de la fuente lineal se ha eliminado el potenciómetro, por lo que ahora el voltaje en la entrada inversora y no inversora es el mismo voltaje que trasmite la fuente lineal en la salida v_{out}

$$v_{C3} = v_+ = v_- = v_{out} \quad (91)$$

Ya que el voltaje en el capacitor es el mismo que está en la salida de la fuente lineal (v_{out}), se debe explicar cómo trabaja el circuito que carga al capacitor. Para entenderlo se presenta el circuito de carga y su representación en forma de interruptor:

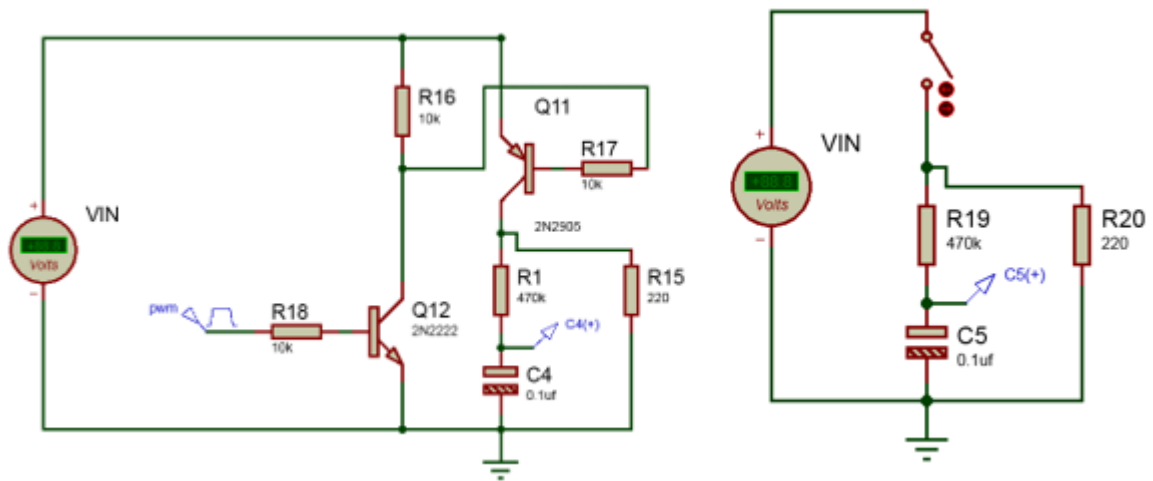


Ilustración 70. Circuito de carga para el capacitor y su equivalente.

En la ilustración 70 se puede ver de manera más clara cómo trabaja la sección “referencia” de la fuente lineal. La función de los transistores es imprimir una señal de pulso al circuito RC. Dicha señal será la encargada de modificar el voltaje medio que se encuentra en el capacitor para tomarlo como referencia en la entrada no inversora del amplificador operacional. El tiempo que la señal de pulso se encuentra en alto se calcula multiplicando el ciclo de trabajo (D) (21) por el periodo (T). Para comprender cómo controlar el voltaje medio en el capacitor, se analiza el circuito RC con el interruptor cerrado y abierto.

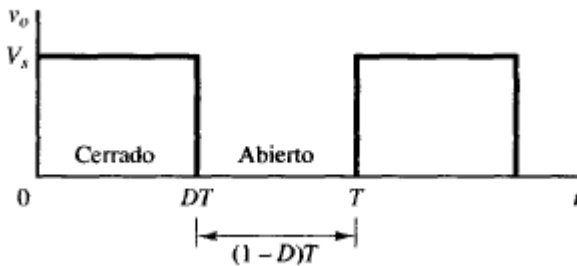


Ilustración 71. Señal de pulso (21)

3.2.4.1 Interruptor cerrado

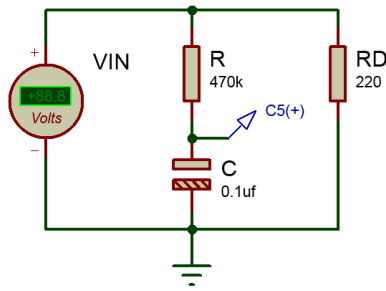


Ilustración 72. Circuito de la ilustración 7 analizado con el interruptor cerrado.

Para esta situación el voltaje V_{IN} alimenta la resistencia R y el capacitor. Aplicando la ley de voltajes en la malla izquierda se obtiene:

$$v_{in} = R \times I_c + v_c \quad (92)$$

$$v_{in} = R \times C \times \frac{dv_c}{dt} + v_c \quad (93)$$

$$\frac{dv_c}{dt} = \frac{\Delta v_c}{\Delta t} = \frac{\Delta v_c}{D \times T} = \frac{v_{in} - v_c}{R \times C} \quad (94)$$

$$\Delta v_c = (v_{in} - v_c) \left(\frac{D \times T}{R \times C} \right) \quad (95)$$

3.2.4.2 Interruptor abierto

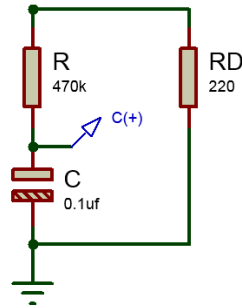


Ilustración 73. Circuito de la ilustración 7 analizado con el interruptor abierto.

Generando ley de voltajes en la única malla presente se encuentra:

$$v_C = (R + R_D) \times I_C = (R + R_D) \times C \times \frac{dv_C}{dt} \quad (96)$$

$$v_C = (R + R_D) \times C \times \frac{\Delta v_C}{\Delta t} = (R + R_D) \times \frac{C \times \Delta v_C}{(1 - D) \times T} \quad (97)$$

$$\Delta v_C = \frac{v_C(1 - D) \times T}{C \times (R + R_D)} \quad (98)$$

Para continuar se debe suponer que el circuito se ha estabilizado y que el capacitor se encuentra oscilando respecto a un voltaje medio. Si esto ya ha ocurrido, es válido hacer equivalentes las ecuaciones 95 y 98. El resultado que se obtiene es el voltaje en el capacitor:

$$(v_{in} - v_C) \left(\frac{D \times T}{R \times C} \right) = \frac{v_C(1 - D) \times T}{C \times (R + R_D)} \quad (99)$$

$$(v_{in} - v_C) \left(\frac{D}{R} \right) = \frac{v_C(1 - D)}{(R + R_D)} \quad (100)$$

$$v_C = v_{in} \times D \times \frac{R + R_D}{R + D \times R_D} \quad (101)$$

3.2.4.3 Comprobación del funcionamiento

Utilizando un ciclo de trabajo de $D = 0.2$ y una frecuencia de 500 Hz, en el circuito de la ilustración 69, se obtienen los siguientes resultados:

$$v_C = (24v - 0.68v) \times 0.2 \times \frac{470k\Omega + 220\Omega}{470k\Omega + 0.2 \times 220\Omega} = 4.66v \quad (102)$$

$$\Delta v_C = (24v - 0.68v - 4.8v) \left(\frac{0.2 \times \left(\frac{1}{500} \right) s}{470k\Omega \times 0.1\mu f} \right) = 0.158v \quad (103)$$



Ilustración 74. Voltaje en el capacitor.

El voltaje resultante en la salida del regulador lineal se puede ver en la figura 75. Es importante aclarar que los cálculos contemplaron la pérdida de voltaje en el transistor Q_9 la cual es de $0.68v$, por lo que para obtener mejores resultados debe restársele dichas perdidas a la variable V_{in} en las ecuaciones halladas:

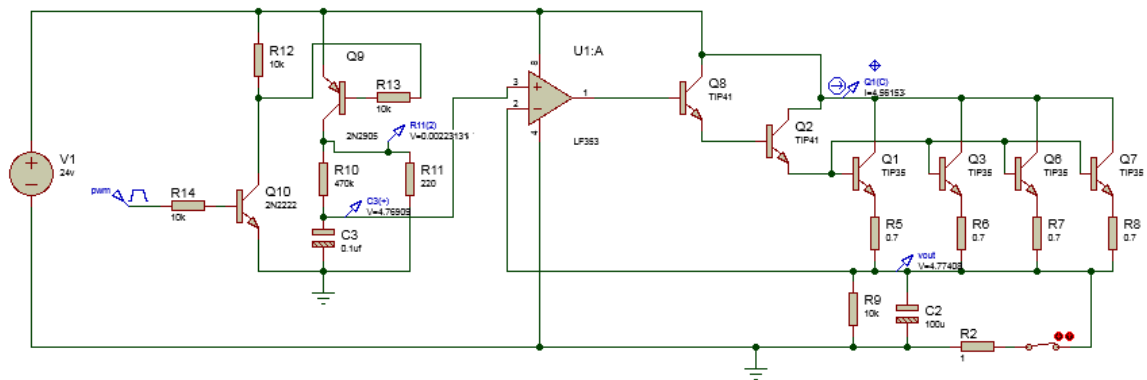


Ilustración 75. Funcionamiento de fuente lineal controlada por PWM.

3.2.5 Fuente lineal controlada por regulador

En la mayoría de los casos es necesario alimentar circuitos digitales con la menor cantidad de elementos posibles. Para dichos casos se presenta una configuración que conserva los mismos niveles de potencia que se mostraron en la fuente lineal controlada por señal PWM implementando un regulador lm317.

Según el diagrama de bloques funcional que representa al regulador lm317, se puede esperar que el voltaje presente en las terminales *Adj* y *Output* sea de 1.25v. La función del amplificador operacional es básicamente igualar los voltajes de la terminal inversora y no inversora para crear una diferencia de potencial de 1.25v entre el *Adj* y *Output*.

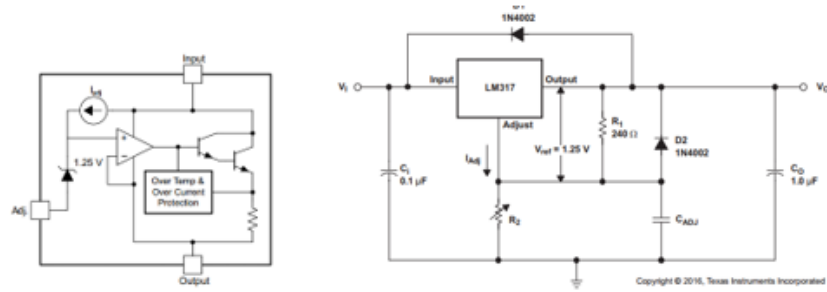


Ilustración 76. Regulador de tensión LM317

El voltaje de salida está dado por:

$$output = 1.25v + v_{R2} = 1.25v + R_2 \times (i_{adj} + \frac{1.25v}{R_1}) \quad (104)$$

Según el datasheet la corriente i_{adj} puede ser despreciable, ya que es de $50\mu A$, por lo que la ecuación se convierte en:

$$output = 1.25v + R_2 * \left(\frac{1.25v}{R_1}\right) = 1.25v \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \quad (105)$$

Para incrementar la potencia de salida de este regulador se usa la misma configuración de transistores que se implementó anteriormente, compensando la pérdida de voltaje agregando un diodo en serie con la resistencia R_2 :

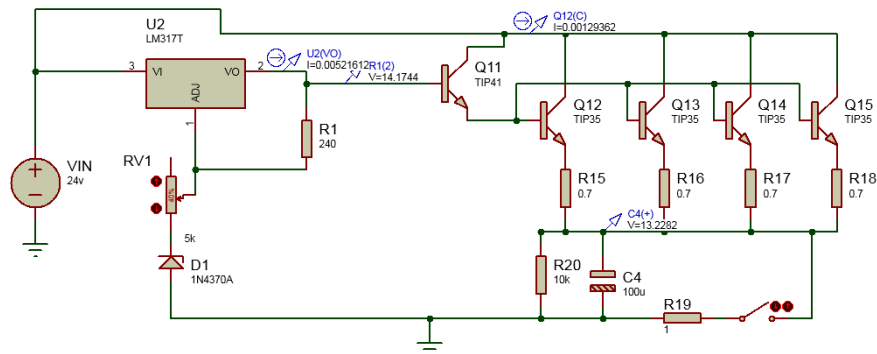
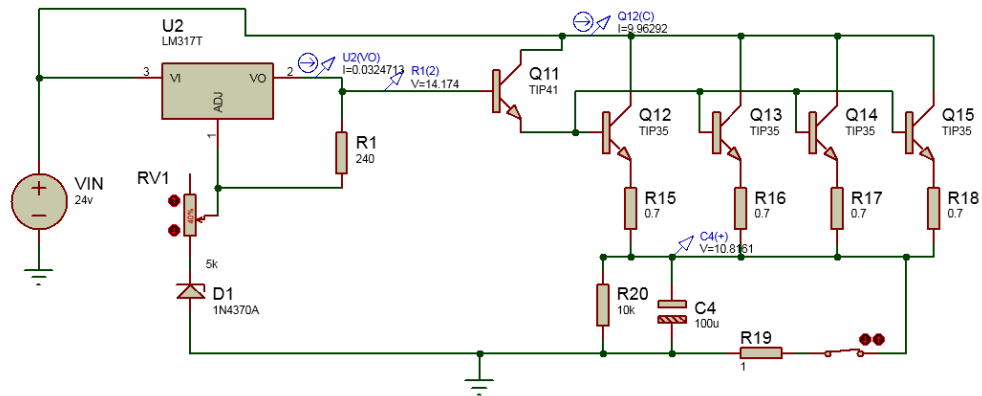


Ilustración 77. Fuente lineal controlada por regulador LM317.
(Antes de alimentar la carga de 1 Ohm)



*Ilustración 78. Fuente lineal controlada por regulador LM317.
(Alimentando carga de 1 Ohm)*

Esta configuración, aunque no es igual de exacta a la anterior, permite crear fuentes lineales con más rapidez y potencias bastante aceptables. Por lo general el regulador que se implementa es de voltaje constante, como el regulador Im7805, lo que provoca que la conexión sea aún más rápida. En este caso únicamente se debe agregar el diodo en la terminal Ground del regulador para compensar las pérdidas de la etapa de potencia.

Antes de implementar cualquier configuración presentada anteriormente, se debe conocer cómo se desea controlar el voltaje y la cantidad de potencia que se desea alimentar, por ejemplo, Si el circuito es netamente digital y la corriente total de consumo llega a 3A se podría pensar en implementar la fuente de la sección 2.2.3, ya que es bastante exacta a niveles altos de corriente y las variaciones de voltaje pueden llegar a ser muy pequeñas. Por el contrario, si el circuito no necesita gran precisión y los niveles de corriente son menores a un amperio, se puede implementar la fuente de la sección 2.2.5 reduciendo las etapas de potencia a un transistor. Para situaciones en donde es necesario controlar el voltaje sobre la carga sin usar un voltaje pwm sobre éste, la fuente de la sección 2.2.4 es la ideal. A continuación, se presenta el circuito de control y según las necesidades presentes se argumenta el tipo de fuente a implementar.

3.3 DISEÑO DEL CIRCUITO DE CONTROL

Antes de pensar en qué tipo de fuente implementar o no, se analiza la cantidad de componentes electrónicos que debe utilizar el robot Scara. Si el robot debe controlar e indicar el estado de motores paso a paso o reductores inevitablemente se debe adquirir un microcontrolador que se encargue de dichas tareas. La interfaz de comunicación entre el usuario y máquina debe contener una LCD que indique cada proceso que esté haciendo el robot y una serie de pulsadores que permitan al usuario controlar los procesos, además de esto dicha interfaz debe extenderse para poder controlar el robot desde el computador. Teniendo en mente esto se puede agrupar el diseño del circuito de control en las siguientes etapas:

- Interfaz de comunicación
- Control de motores
- Selección de microcontrolador
- Selección de la fuente lineal.

3.3.1 Interfaz de comunicación

Como se mencionó anteriormente uno de los elementos que se debe incluir es la LCD, el cual se encarga de mostrar la posición actual de los motores, el estado del actuador final (encendido o apagado), la velocidad de los motores y la acción que está desempeñando. Para lograr hacer esto en el mercado se dispone de pantallas LCD convencionales de 16x2 (16 caracteres en dos líneas), de 20x4 (20 caracteres en cuatro líneas) y pantallas LCD gráficas. La LCD gráfica tiene la capacidad de manejar visualizaciones mucho más complejas con las cuales se puede crear interfaces más agradables para el usuario. Pero debido a la simplicidad de los datos que manipula el robot Scara esta LCD simplemente se desperdiciaría, por lo que se opta por una LCD convencional de 20x4, ya que ésta tiene el espacio necesario para mostrar de una manera agradable todos los datos del motor. La LCD convencional requiere de 6 terminales digitales para su conexión más común.

Para el ingreso de datos se plantea usar 4 señales digitales que le permiten al usuario desplazarse a varios menús mediante las siguientes acciones: aceptar, retornar, desplazamiento 1, desplazamiento 2 y desplazamiento 3. Cada señal digital proviene de pulsadores los cuales contienen dos terminales que se disponen en una configuración “pull down”. también se necesitan dos terminales para la recepción y transmisión de datos vía serial. Por último, se ha pensado en la generación de sonidos que puedan alertar de algún error o el inicio de una rutina, por lo que se implementa un buzzer el cual debe ser activado mediante un transistor. Según lo anterior, para poder crear una interfaz de comunicación se requiere de las siguientes señales.

Tabla 4. Elementos implementados en la interfaz de comunicación.

	Terminales digitales	Terminales análogas
LCD 4x20	6	0
Pulsadores	0	5
Puerto serial	2	0
Buzzer	1	0
Total	9	5

Se desea implementar las señales de los pulsadores como entradas análogas para evitar que sólo señales digitales pueda controlar las acciones que se mencionaron anteriormente.

La conexión de la LCD se puede ver a continuación:

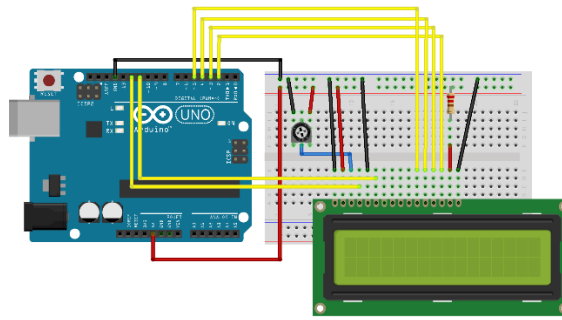


Ilustración 79 Conexión más implementada en la LCD de caracteres. (6 terminales digitales).

La configuración que se ha implementado para los pulsadores se ve en la ilustración 77. La resistencia se ha puesto de $100k\Omega$ ya que de esta manera cada interruptor al activarse consume $50\mu A$, valor que es bastante pequeño. Un valor más grande en la resistencia también habría funcionado.

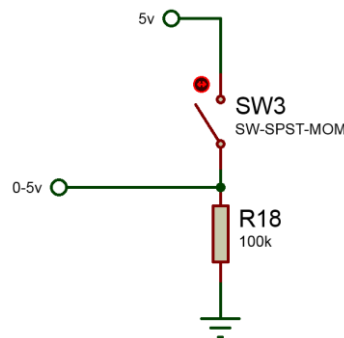


Ilustración 80 Conexión Pull Down para detectar pulsador.

Para activar el Buzzer se debe tener un transistor actuando como conmutador. Se desea implementar un transistor MOSFET en vez de un BJT, ya que estos se pueden activar únicamente con voltaje y así de esa manera impedir que el microcontrolador suministre corriente. Debido a que no se conoce el buzzer que puede adquirir el estudiante, que esté armando el robot, se supone que como máximo implementa uno de 5v 5w, es decir uno de 1A. Para obtener un factor de seguridad de 2 o mayor, el transistor debe tener un voltaje máximo entre el drenaje y la compuerta de 10V, una corriente máxima de drenaje de 2A para un voltaje de 5V entre gate y drenaje. Comercialmente se encuentra el transistor IRFZ44N, transistor de $V_{dss} = 55v$, $R_{ds(on)} = 17.5m\Omega$, $P_d = 94w$, $v_{gs} = \pm 20v$, $I_d = 35A$ a $100^\circ C$. Cuya corriente en el drenaje es de aproximadamente 20A cuando hay un voltaje de 5v entre la compuerta respecto a la fuente. Este transistor funciona para dicha aplicación.

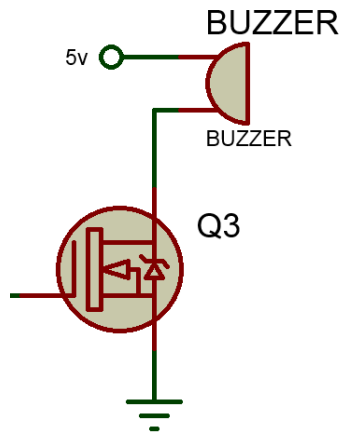


Ilustración 81 Transistor MOSFET de enriquecimiento implementado como conmutador.

Para conocer si el transistor requiere de un disipador se utiliza la analogía de transferencia de calor mediante resistencias para conocer la temperatura interna del transistor. Las variables t_j y t_a representan la temperatura de la unión del transistor y la temperatura ambiente.

$$(R_{ja}) * w = (t_j - t_a) \quad (106)$$

$$t_j = 62 \frac{^{\circ}C}{w} * 1A^2 * 17.5m\Omega + 25^{\circ}C \quad (107)$$

$$t_j = 26^{\circ}C \quad (108)$$

Lo anterior demuestra otra ventaja de los transistores MOSFET de canal N, dichos transistores poseen un consumo de potencia realmente bajo cuando se usan en conmutación. Este bajo consumo se debe a la resistencia interna que se genera al estar encendidos, la cual es de un bajo valor.

3.3.2 Control de motores

Para el manejo adecuado de los motores, paso a paso o reductor, se debe pensar en la mejor etapa de potencia que se pueda implementar para poder controlar ambos en un mismo driver. Una de las maneras más sencillas de controlar motores reductores se puede ver en la referencia (8), en donde se aplica un voltaje medio al motor de tal manera que se le puede controlar la velocidad y sentido de giro.

El circuito implementado para lograr este control se le conoce como puente H y es el mismo que permite generar el control de motores paso a paso “bipolares”, motor que se ha escogido como alternativa al motorreductor. El circuito de control debe generar las señales que recibe el driver que contiene el puente h, y así activar el movimiento de los motores. Si se desean mover 3 motores bipolares se necesitan 6 puente h y por lo tanto 9 señales digitales del microcontrolador, ya que el driver se diseña de tal manera que se requieran sólo de tres señales de activación por cada dos puente h. Además de esto se necesita controlar la activación de la herramienta de trabajo del robot, la cual puede ser un gripper (23) (10) o un láser. Para cualquiera de los dos casos únicamente es necesario enviar una señal de pulso que permita generar un PWM para el servomotor del gripper o la activación del láser.

El tipo de control que se propone para esta máquina es un control en lazo cerrado, (24) ya que ésta es la única manera de conocer de alguna manera cuál es la posición de los motores y actuar respecto a esto. Si se implementa un control en lazo abierto, el control se basaría únicamente en activar señales durante un determinado tiempo sin verificar que la planta (24) haya llegado a su referencia. No verificar de alguna manera la posición de los motores causaría la falla inmediata del mecanismo por lo que se hace indispensable disponer de terminales análogas para la lectura de los sensores. Se propone utilizar dos finales de carrera para el motor del eje z y dos sensores de herradura para los eslabones rotacionales.

Para poder crear el control de los motores se necesita:

Tabla 5. Elementos implementados en el control de los motores

	Terminales digitales	Terminales análogas
Driver de motores	10	0
sensores	0	4

3.4 DISEÑO DEL DRIVER

Para el diseño del driver se elabora un puente H el cual sea capaz de controlar la polaridad de la carga con un único pulso, para que de esta manera con dos pulsos se pueda controlar un motor paso a paso bipolar. Anteriormente se comentó que el diseño se basaría en tres pulsos por cada dos puente H. El tercer pulso permite inhabilitar el cambio de polaridad automático y así poder controlar un motor reductor como se mostró en la referencia (8). El diseño se basa en transistores mosfet (Enriquecimiento) ya que la corriente en la compuerta (gate) es prácticamente nula y esto es algo de lo que se toma ventaja nuevamente. La configuración que permite activar por completo los transistores Mosfet de canal N y de canal P se muestra a continuación:

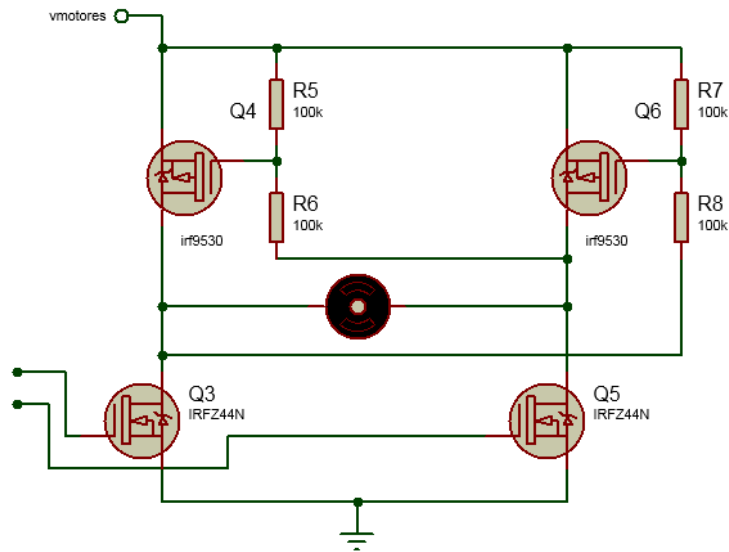


Ilustración 82. Diseño inicial para el puente H

Se recuerda que el transistor Mosfet de enriquecimiento de canal P se activa con voltajes negativos de la compuerta respecto a la fuente. Por lo que cuando el transistor “Q5” se activa, este conecta una terminal de la resistencia “R6” a tierra, generando que el voltaje en la resistencia “R5” sea:

$$v_{r5} = v_{motores} \cdot \left(\frac{R_5}{R_5 + R_6} \right) \quad (109)$$

El voltaje de la resistencia “R5” es el voltaje que hay entre la fuente (source) del transistor respecto a la compuerta, por lo que un voltaje positivo en esta resistencia representa un voltaje negativo de la compuerta respecto a la fuente. Se ha escogido dichos valores para que el divisor de voltaje haga variar la polarización de la resistencia “R5” de 6v a 12v cuando el voltaje de los motores está entre 12v y 24v. de esta manera no se supera los valores máximos en compuerta que son de $\pm 20v$.

Cuando llegan 5v a la compuerta del transistor Q_5 éste se satura junto con el transistor Q_4 , produciendo que se alimente el motor en un sentido. Para polarizarlo en sentido opuesto se activa el transistor Q_3 .

Algo a tener presente es que en ningún momento se puede tener activados todos los transistores ya que esto equivaldría a un corto circuito. Para evitar esto se agrega una compuerta lógica NOT para que con una señal se pueda activar correctamente el puente H.

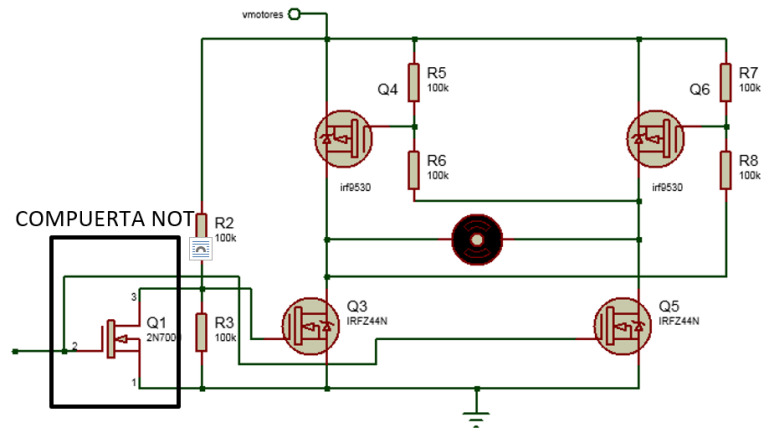


Ilustración 83. Compuerta NOT agregada al puente H.

Lo anterior significa que no es posible desactivar el motor, es decir que se polarice con cero voltios. Para lograr esto se agrega un transistor que bloquea la compuerta NOT que se acaba de agregar. El resultado final es el siguiente:

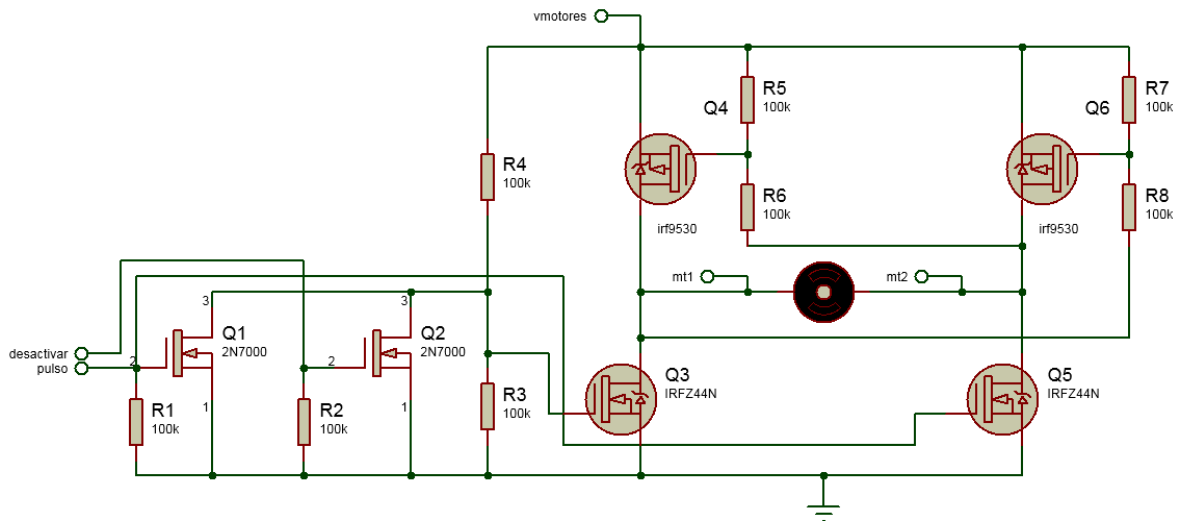


Ilustración 84. Configuración final del puente H

La tabla de verdad que representa dicho puente h, tomando como variables las terminales “pulsos” y “desactivar”, es:

Tabla 6. Tabla de verdad del puente H

Pulso	Desactivar	Polaridad ($m_{t1} - m_{t2}$)
1	0	+vmotores
0	0	-vmotores
1	1	+vmotores
0	1	0v

Ahora se debe conectar otro puente h y hacer común la conexión desactivar. De esta manera se puede controlar con únicamente tres pines la polaridad de un motorreductor o la polaridad de dos bobinas de un motor paso a paso bipolar.

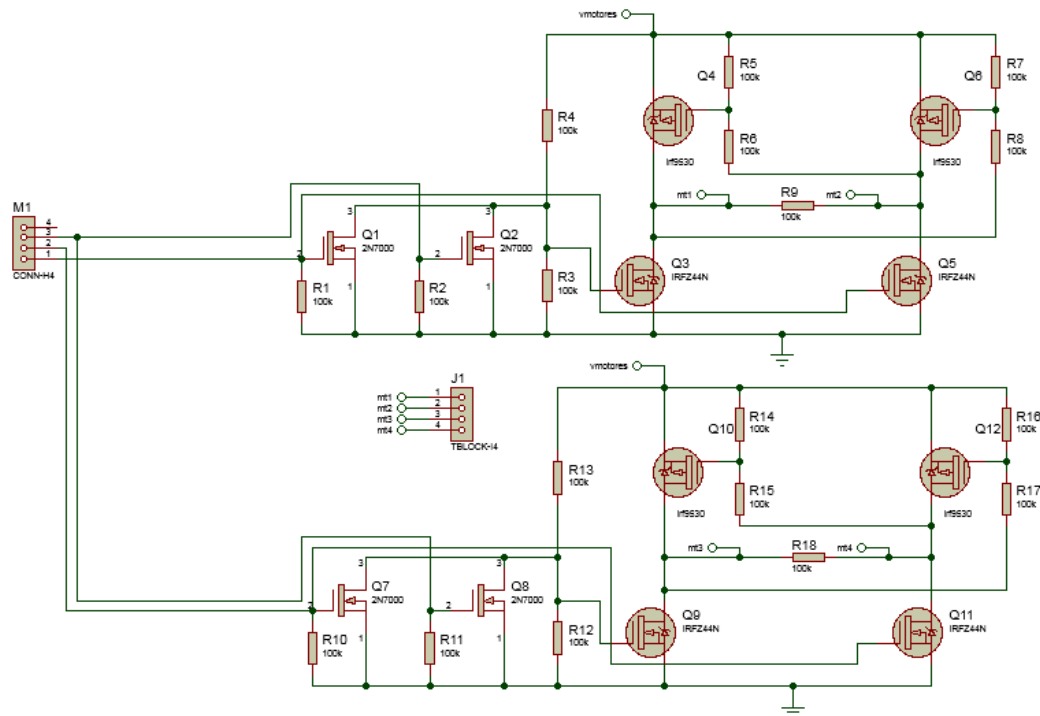


Ilustración 85. Diseño final para el driver de motores.

Se escoge una corriente de 4A como referencia de consumo ya que la mayoría de los motores paso a paso que se encuentran en el mercado consumen como máximo 4 A, por bobina. Con un voltaje máximo de 24v. La potencia en este diseño no es un valor crítico ya que estos transistores se encuentran totalmente saturados, sin embargo, se debe evaluar la temperatura que pueden llegar a alcanzar ya que este valor se puede incrementar fácilmente en algunos transistores. En resumen, para que este driver funcione correctamente los parámetros de los transistores Mosfet de canal N y P como mínimo deben ser:

Tabla 7. Propiedades mínimas para un correcto funcionamiento del driver

Parámetro	Transistor canal N	Transistor canal P
v_{ds}	48v	-48v
I_D	8A	-8A
v_{gs}	+20v	-20v

En este diseño no se toma en cuenta el tiempo que demora el transistor en conmutar ya que como máximo se cambiará la polaridad de la bobina a una frecuencia de 340hz. Valor que es completamente fácil de superar para la mayoría de los transistores.

La tabla 7 revela que el transistor IRFZ44N, el mismo implementado para la activación del buzzer, posee una corriente máxima y un voltaje máximo adecuado al igual que el irf9530. Además, es importante mencionar que estos transistores son completamente comerciales, por lo que no habrá problema alguno al implementar el driver.

La temperatura que alcanzan el transistor irz44n, el cual está soportando una corriente de 4A y tiene una resistencia de activación de $17.5m\Omega$ es:

$$t_j = 62 \frac{^{\circ}C}{W} * 4A^2 * 17.5m\Omega + 25^{\circ}C = 42.36^{\circ}C \quad (110)$$

Esto revela es dicho transistor funcionará perfectamente sin implementar un disipador. Para el transistor irf9540, el cual soporta la misma cantidad de corriente, posee una resistencia térmica de la unión al ambiente de $62 \frac{^{\circ}C}{W}$ y una resistencia de activación de 0.3Ω , la temperatura es:

$$t_j = 62 \frac{^{\circ}C}{W} * 4A^2 * 0.3\Omega + 25^{\circ}C = 322.6^{\circ}C \quad (111)$$

El aumento de la temperatura en el transistor de canal P es crítico, por lo que se hace necesario modificar el valor de la resistencia térmica entre la unión y el ambiente por un valor de por lo menos $31.25 \frac{^{\circ}C}{W}$ para que la temperatura llegue máximo a $175^{\circ}C$, temperatura máxima que soporta el transistor. La resistencia térmica requerida es la suma de la resistencia entre unión-

cápsula, capsula-disipador y disipador-ambiente. Según la hoja de especificaciones del transistor irf9530 la resistencia de la unión y la capsula es de $1.7 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{w}}$ por lo que la resistencia equivalente que debe representar al disipador es de $29.6 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{w}}$.

Los transistores 2n7000 son los encargados de activar o desactivar los transistores de potencia, por lo que estos no representan un gran consumo de potencia o corriente.

Para controlar la activación de la herramienta de trabajo del robot Scara se debe conocer el voltaje y corriente que manipula el actuador del gripper, al igual que los parámetros que requiere el láser para su correcto funcionamiento. El servomotor(MG996) que se desea implementar tiene un voltaje de operación de 4.8v a 6v con una corriente máxima de 0.9A. Lo que significa que es necesario implementar una fuente lineal para reducir el voltaje de la fuente principal. De todas las fuentes presentadas anteriormente la más conveniente para esta sección es la fuente 3.2.5, ya que los niveles de corriente no son significativos y la precisión del voltaje regulado no debe ser exacto. La potencia de consumo del láser es de 3W a 12v, por lo que la corriente que consume es de 0.25A. Esto significa que se debe diseñar la fuente de tal manera que soporte al servomotor, el cual representa mayor consumo de potencia.

La fuente diseñada debe entregar una corriente máxima de 0.9A por lo que para mantener un factor de seguridad mínimo de 2 se debe agregar un transistor que impida que el regulador suministre valores altos de corriente. Si el voltaje de la fuente principal es de 24v, el transistor puede estar recibiendo un voltaje de 0v a 12v entre su colector respecto al emisor, por lo que como mínimo debe soportar 24v de colector a emisor para mantener un factor de seguridad de 2. Además, debe tener una corriente máxima de colector de 2A. Cuando el servomotor se alimenta con 6v la potencia en el transistor es:

$$P = (24v - 6v) * 0.9A = 16.2W \quad (112)$$

Por lo que el transistor debe tener como mínimo una potencia de 32.4w. El tip 41c cuenta con parámetros superiores a los indicados, por lo que se implementa en esta fuente. Para que el transistor alcance una temperatura menor de 75°C debe utilizarse un disipador que represente una resistencia térmica de $2.4 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{w}}$. Las resistencias del regulador se han puesto de tal manera que el voltaje máximo de salida v_{out} no supere los 13.75v.

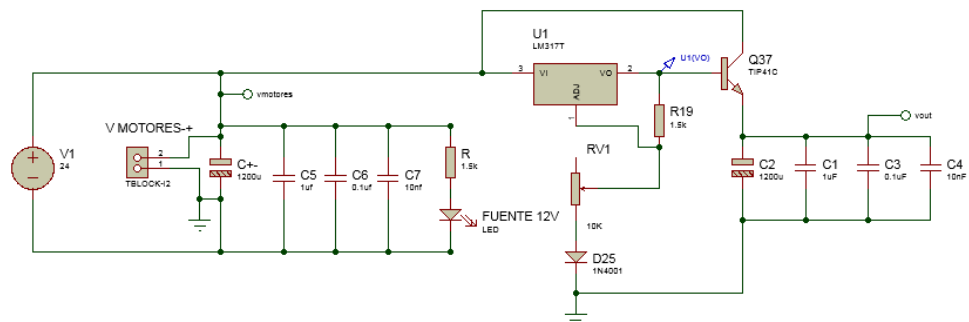


Ilustración 86 Fuente lineal implementada

Se ha agregado un capacitor electrolítico y varios monolíticos con el fin de almacenar un gran nivel de carga y filtrar ruidos que afecten el correcto funcionamiento del servomotor.

3.4.1 Selección del microcontrolador

Debido a que este robot va a ser implementado como herramienta de trabajo para estudiantes, se plantea usar la plataforma Arduino ya que ha tomado gran fuerza como herramienta de enseñanza de programación y de electrónica. Se plantea dividir el circuito en dos módulos en donde uno se encarga de controlar totalmente los motores mientras que el otro de manejar las señales provenientes del interfaz usuario-máquina. Analizando el microcontrolador ATMEGA328P implementado por Arduino es posible observar que para las necesidades de los dos módulos éste es el adecuado.

Tabla 8. Datos del microcontrolador seleccionado. (25)

Microcontrolador

ATmega328P

Tensión de funcionamiento 5V

Voltaje de entrada (recomendado) 7-12V

Voltaje de entrada (límite) 6-20V

Pines de E / S digitales 14 (de los cuales 6 proporcionan salida PWM)

Pines de E / S digitales de PWM 6

Clavijas de entrada analógica 6

Corriente DC por Pin E / S 20 mA

Corriente DC para 3.3V Pin	50 mA	
Memoria flash	32 KB (ATmega328P) de los cuales 0,5 KB utilizados por el gestor de arranque	
SRAM	2 KB (ATmega328P)	
EEPROM	1 KB (ATmega328P)	
Velocidad de reloj	16 MHz	

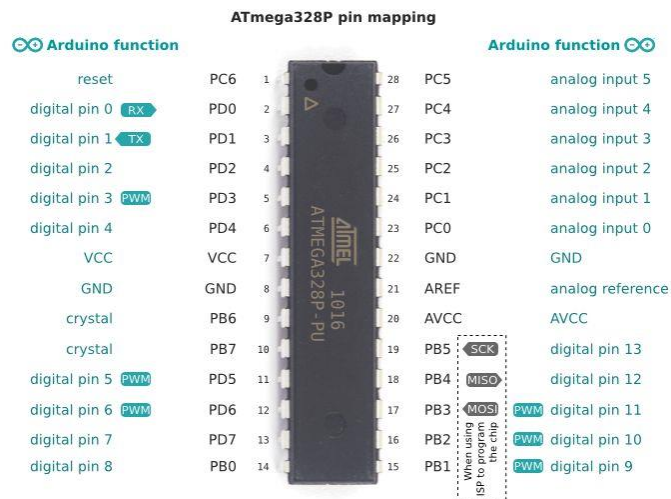
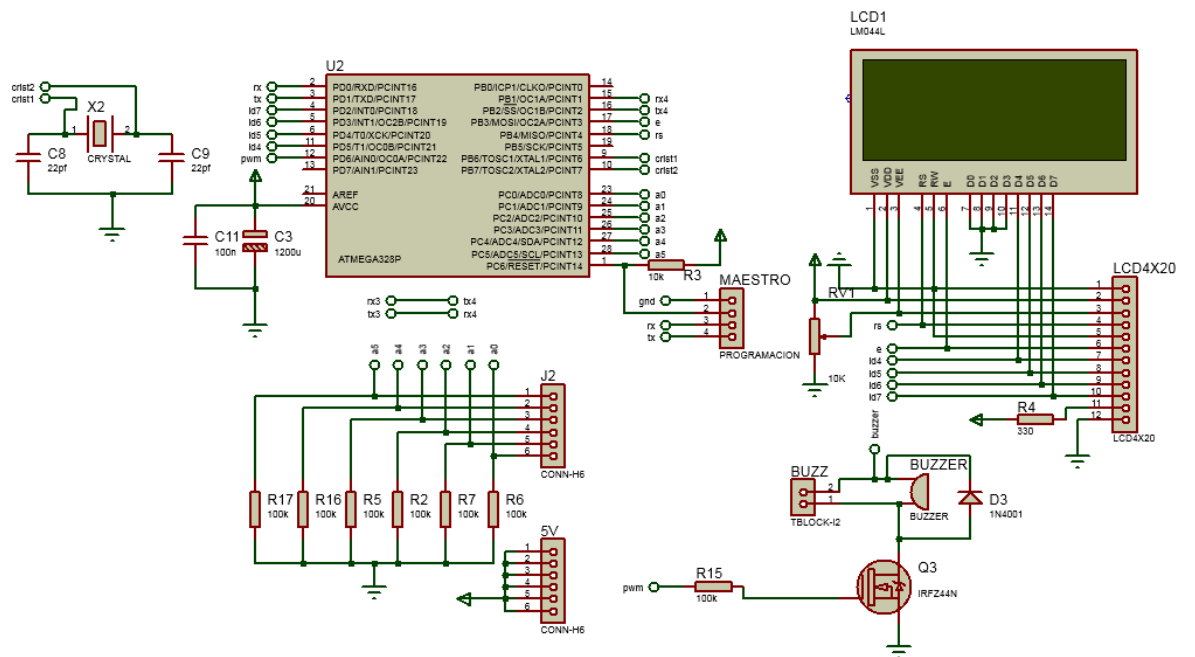
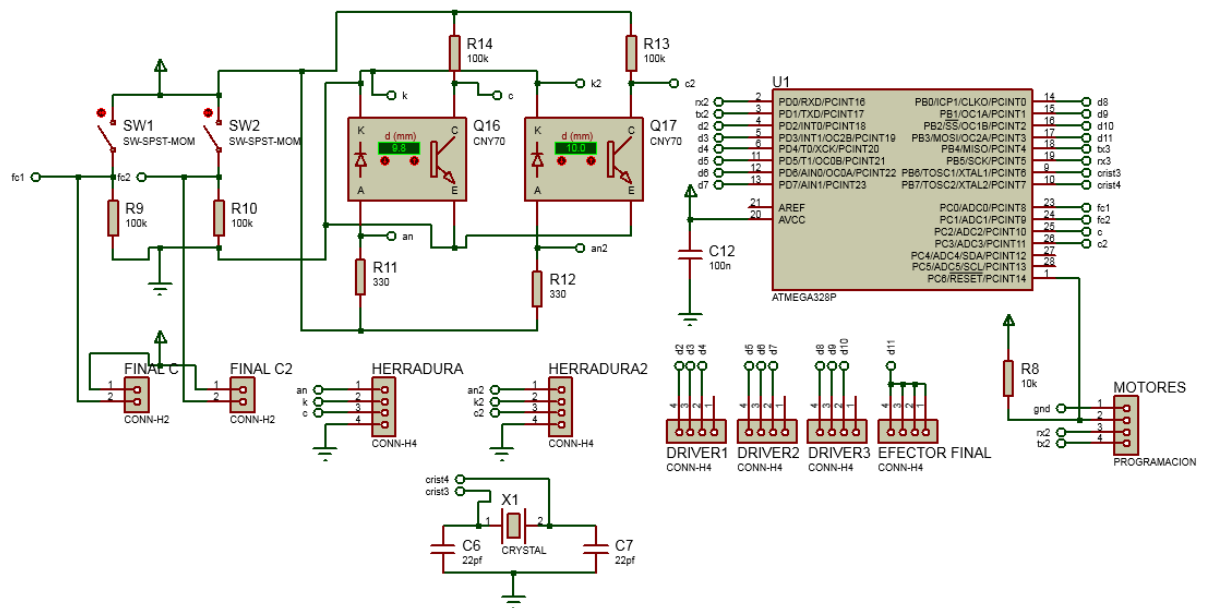


Ilustración 87. Microcontrolador ATMEGA 382P (25)

Ya conociendo que microcontrolador implementar, se procede a hacer las conexiones del circuito de control en Proteus:



a)



LA ilustración 88.b contiene dos sensores “final de carrera” que se encuentran en configuración “pull down”. El valor de las resistencias se ha puesto de $100k\Omega$ para evitar que haya un consumo de corriente innecesario, ya que la función de estas es permitirle al microcontrolador detectar voltajes entre 5v a 0v. Para los sensores de herradura se ha dispuesto su configuración básica. La función de estos es detectar la posición angular de los eslabones rotacionales y así poder controlar la posición del actuador final del SCARA.

Los microcontroladores poseen la conexión básica para su funcionamiento y se ha agregado cada uno de los dispositivos que se había descrito anteriormente. Se ha creado una comunicación serial entre los dos microcontroladores para que entre estos se puedan indicar el estado de los motores o la posición de referencia a la que se desea llegar.

3.4.2 Selección de la fuente lineal

Debido a que el buzzer es un elemento que puede llegar a producir ruido eléctrico en el circuito, se aísla de los microcontroladores creando fuentes lineales por aparte. Por otra parte, ya que se está trabajando con niveles de corriente que no superan el amperio, se escoge la fuente lineal controlada por regulador (fuente 2.2.5). El resultado es el siguiente:

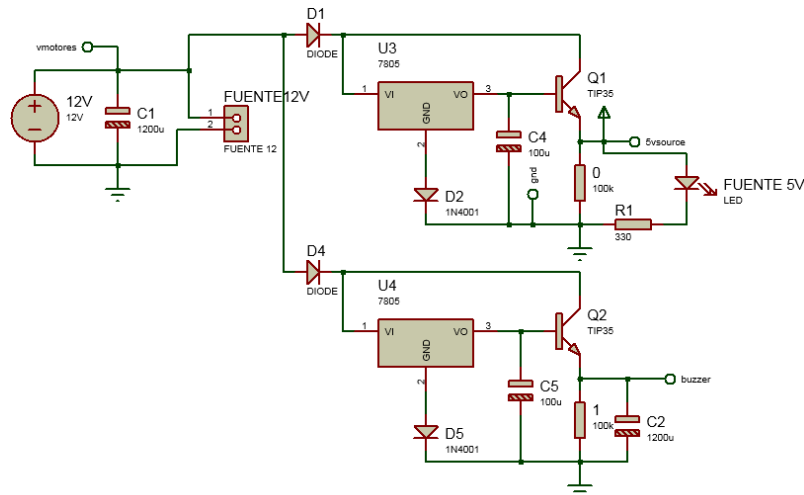


Ilustración 89. Fuentes lineales escogidas para el circuito de control

Se agregan diodos de protección para evitar polarizar el circuito en inversa y se agrega únicamente un transistor en la etapa de potencia. Esto se hace ya que los reguladores 7805 máximo pueden entregar 1.5A, y el factor de seguridad que se desea obtener es de mínimo 2. Agregando el transistor tip35C la corriente del regulador llega a un máximo de 66mA y por lo tanto un factor de seguridad de 22.

La potencia máxima de consumo por parte del transistor (Tip 35c) llega a los 7W con corrientes de 1 A. lo anterior significa que esta fuente podrá soportar con facilidad tanto el buzzer como el circuito digital ya que el transistor es de 125W.

El diseño CAD de cada circuito se puede ver a continuación:

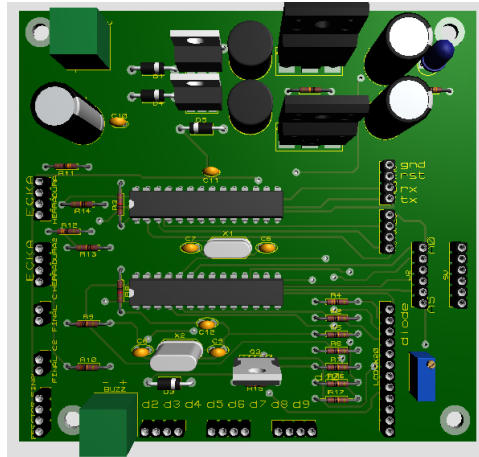


Ilustración 90 Tarjeta de control

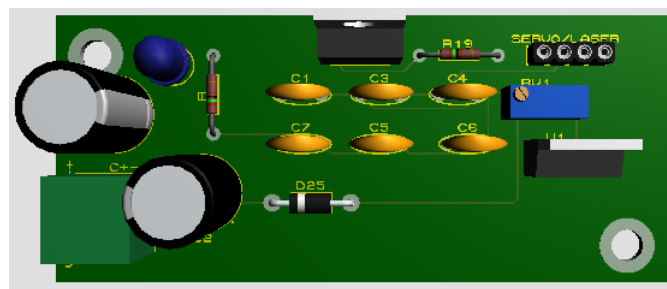


Ilustración 91 Fuente lineal

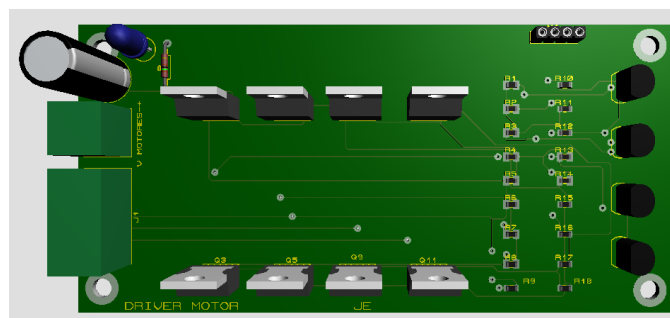


Ilustración 92. Driver

4. OBJETO VIRTUAL DE APRENDIZAJE

El objeto virtual de aprendizaje que se propone para el aprendizaje de los conceptos básicos de la robótica se ha enfocado en simular en tiempo real el funcionamiento de los robots más importantes en la robótica, permitiéndole al estudiante familiarizarse con cada uno de éstos entendiendo toda la teoría que permite su simulación. Se le ha dado gran importancia a la simulación debido a que esta es una forma de aprendizaje visual que permite captar la atención mientras transmite un concepto que por lo general es difícil de comprender en las lecturas de robótica. En resumen, el software que se diseña explica a los estudiantes los siguientes temas:

- Modelo del entorno operativo.
- Cinemática directa.
- Cinemática inversa

El software además de presentar conceptos y simularlos, da la posibilidad de transmitir información a placas electrónicas que pueden estar controlando alguno de los cuatro tipos de robots implementados en el programa. Esto significa que el software puede calcular la planeación de trayectoria, la cinemática inversa y la cinemática directa para enviar los datos vía Serial y así permitirle al estudiante manipular el robot que haya construido. El software permite cargar trayectorias desde algún Excel y así crear rutinas que perfectamente le permiten a un robot realizar alguna tarea.

El proceso en el cual el estudiante conecta su robot con el programa es necesario indicar las dimensiones de los eslabones para calcular correctamente las matrices homogéneas y por lo tanto la cinemática directa e inversa. Una vez se poseen estos valores el programa tiene la capacidad de cargar la forma de todos los eslabones y obstáculos presentes en el entorno operativo del robot, para calcular la planeación de trayectoria evitando colisiones. Sin embargo, si esta opción exige mucho procesamiento generando demoras en la respuesta del software, se puede desactivar para simular únicamente la cinemática inversa y directa sin ningún problema.

Además de esto el programa puede simular el movimiento del robot teniendo en cuenta la velocidad de cada coordenada generalizada y restricciones físicas del robot. Como se verá más adelante, en la sección “Cargar Datos” se precisa la forma del robot, las velocidades y las restricciones físicas. Con el fin de simular lo más exacto posible el robot evitando calcular posiciones que producirían una falla del mecanismo. Para los robots implementados, exceptuado el robot cartesiano, la cinemática inversa posee dos soluciones para un mismo punto. Lo que significa que el algoritmo no solo debe calcular la solución posible, también debe evaluar la solución más corta.

El IDE (Entorno de desarrollo Integrado) adoptado para el desarrollo del objeto virtual de aprendizaje es Matlab. Se utiliza dicho Software ya que facilita la implementación del algoritmo permitiendo que se realice en poco tiempo. Aunque esto significa limitar el público que puede estar interesado en implementar el programa, ya que este no es un software libre. Sin embargo, para diseños posteriores se plantea usar lenguajes de alto nivel como Java o C++.

Para poder entender la construcción del software se muestra el diagrama de flujo que lo describe, para entrar a explicar cada sección. El diagrama de flujo se muestra a continuación.

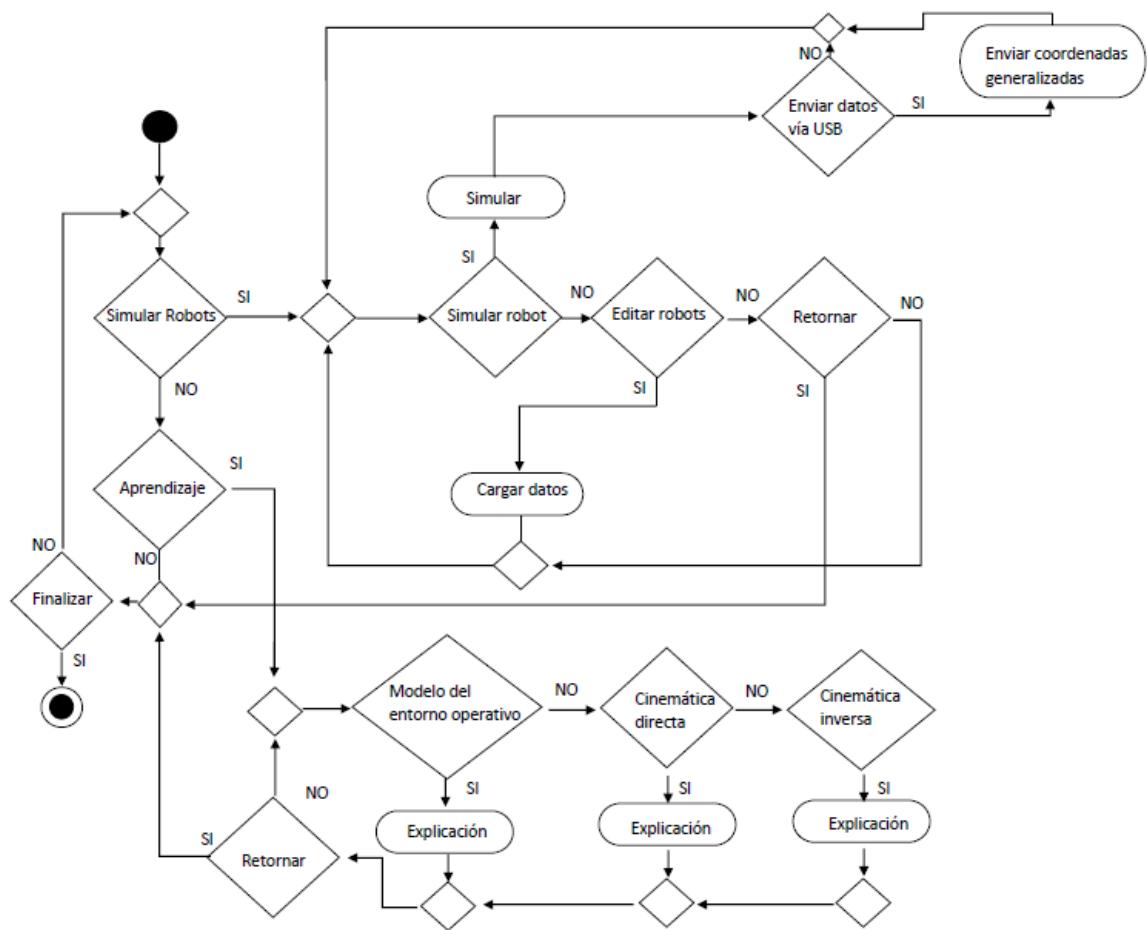


Ilustración 93 Diagrama de actividad del software.

El inicio del algoritmo indica las dos posibles secciones a las cuales el estudiante puede ingresar a trabajar. Se poseen dos símbolos de decisión que permiten la ejecución de la interfaz de aprendizaje o de simulación. La interfaz que se ha dispuesto para esta sección es:



Ilustración 94 Selección del área de interés.

Si se escoge la sección de aprendizaje el estudiante tiene la capacidad de escoger los tres temas más básicos de la robótica: Modelo del entorno operativo del robot, cinemática directa y cinemática inversa. Es importante aclarar que para la explicación de estas tres grandes bases de la robótica se ha tomado como referencia los libros “Fundamentos de robótica y mecatrónica con MATLAB y Simulink” (2) y “MATLAB APLICADO A ROBÓTICA Y MECATRÓNICA” (10).

4.1 MODELO DEL ENTORNO OPERATIVO DEL ROBOT

En esta sección del programa se encuentran los siguientes temas:

- Movimiento rígido.
- Producto punto
- Matriz de rotación
- Matriz de rotación en los ejes x,y,z.
- Transformación de un punto a un nuevo sistema coordenado.
- Rotación de objetos.
- Composición de matrices.
- Matriz homogénea
- Transformación entre ejes coordenados

Los anteriores temas preparan al estudiante para comprender la cinemática directa de cualquier robot. Prácticamente le da las herramientas que le permite relacionar todos los objetos presentes en el espacio de trabajo respecto a un plano base. Por eso mismo a esta sección se le ha llamado “modelo del entorno operativo del robot”. Lo anterior permite conocer la ubicación de cada eslabón de la estructura y por lo tanto determinar si el robot entra en colisión con otro objeto presente en el entorno. Por esto esta sección es indispensable en el algoritmo que se de generar la planeación de trayectoria del robot teniendo en cuenta los obstáculos.

Para mostrar un ejemplo de cómo se ve la explicación de un concepto, se ha incluido la ilustración 95. En donde hay una interfaz que contiene una imagen y un cuadro de texto que explica el significado del “Movimiento rígido”, el cual según la literatura se relaciona con el movimiento de un objeto respecto a un plano el cual es rígido (estático). Es decir que todos los objetos pueden relacionarse respecto a un marco de referencia fijo para describir su posición y calcular un estado futuro.

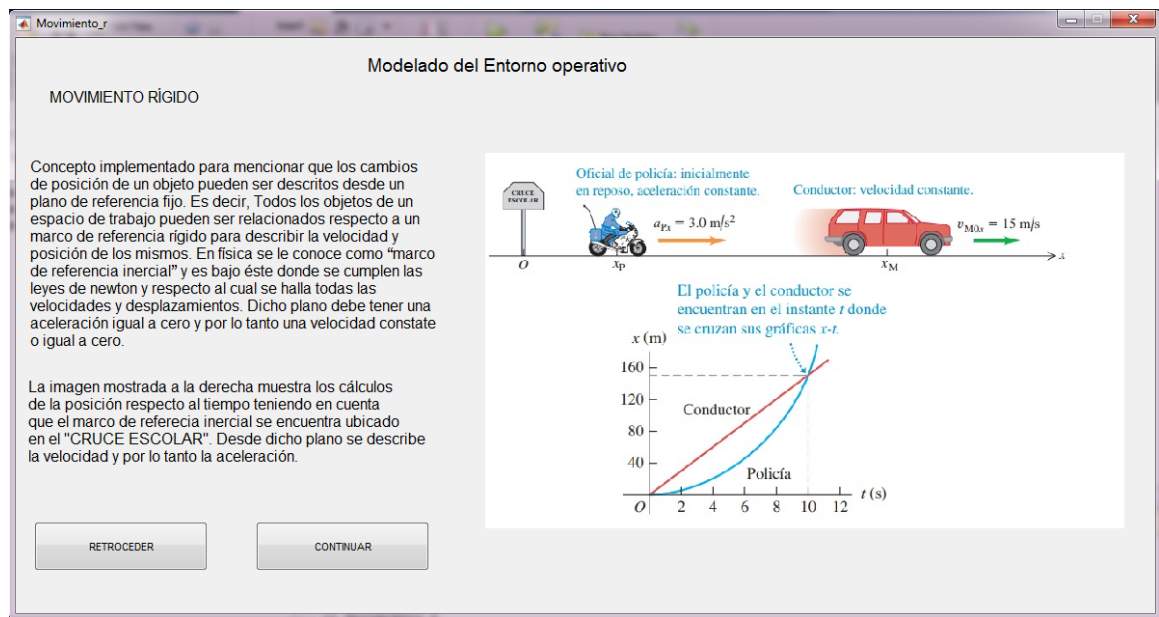


Ilustración 95. Explicación del concepto Movimiento Rígido.

Para el caso de la rotación de un cuerpo rígido se crea una explicación animada en donde el estudiante puede ver la variación de los parámetros de la matriz de rotación a través del eje x, mientras el objeto se desplaza angularmente.

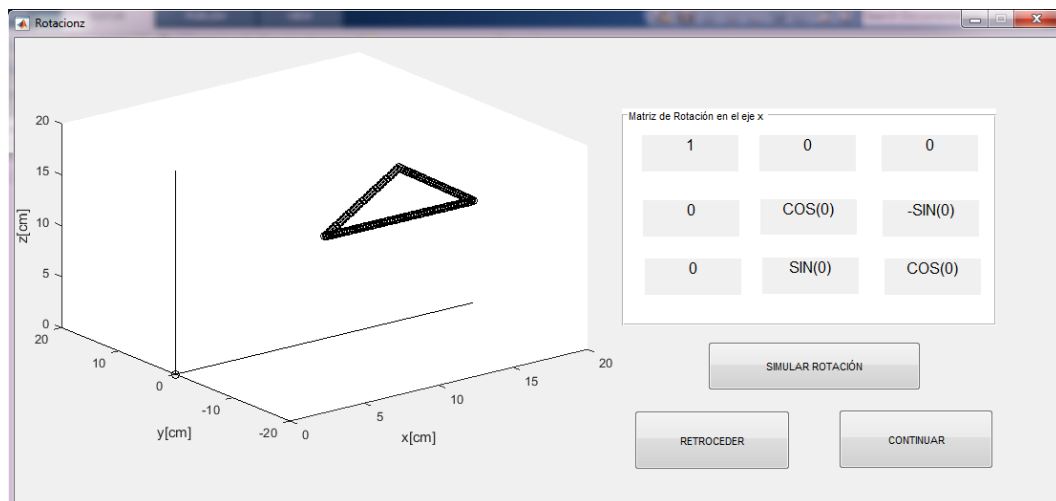


Ilustración 96 Simulación de la rotación de un objeto sobre el eje x (ángulo=0).

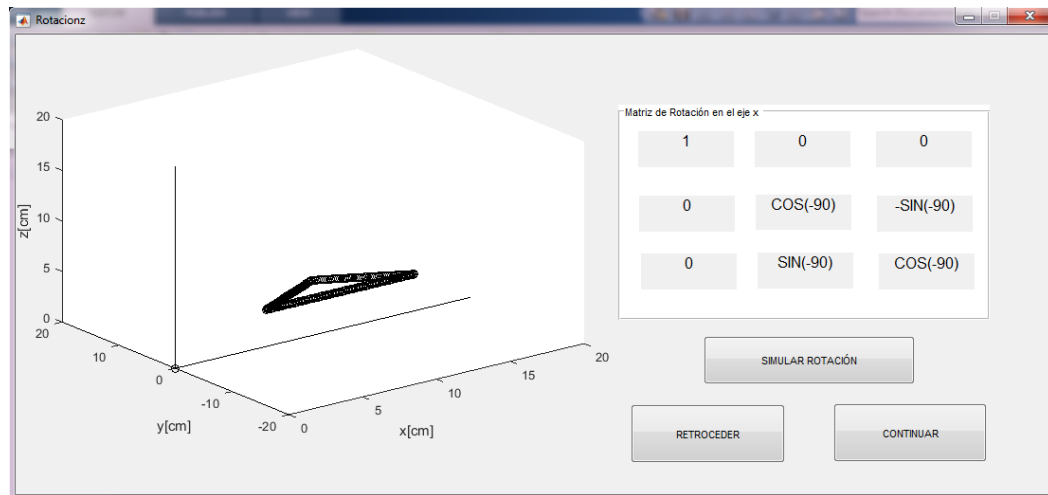


Ilustración 97 Simulación de la rotación de un objeto sobre el eje x (ángulo=-90°).

Simulaciones como ésta y otras que posee el programa permite ver fácilmente la función de las matrices de rotación y de las transformadas homogéneas. El objetivo es mostrar gráficamente lo que un libro no puede hacer. Permitirle al estudiante entender en qué momento se debe implementar cada herramienta y así poder crear perfectamente la cinemática directa de cualquier robot, o el modelado del espacio de trabajo en el que se encuentra.

4.2 CINEMÁTICA DIRECTA

Para lograr determinar la posición de cada sección del robot, en especial la del actuador final, se incluye la cinemática directa, herramienta indispensable para cualquier aplicación relacionada con la robótica. El objetivo es explicar la cadena cinemática de los principales robots que se pueden encontrar tanto en la industria como en la academia. Los temas que se pueden encontrar en esta sección son:

- Grados de libertad
- Articulaciones
- Coordenadas generalizadas
- Convención DH
- Cinemática directa para robot Cartesiano (PPP)
- Cinemática directa para robot Antropomórfico (RRR)
- Cinemática directa para robot Scara (RRP)
- Cinemática directa para robot Scara (PRR)

La sección describe los conceptos adicionales que se deben conocer para complementar la matriz de transformación homogénea y así lograr describir por completo los cuatro robots más comunes de la robótica. Es importante entender que la convención DH es una herramienta opcional que

ayuda a modelar la cinemática directa de un robot, lo que significa que no es una obligación implementarla, sin embargo, se ha incluido entre los temas de estudio para que sea conocida.

Lo anterior se menciona ya que para crear la simulación de los robots e imprimir en una gráfica la forma de los eslabones, es necesario crear matrices homogéneas que no sigan dicha convención. Por ejemplo, se sabe que la matriz DH se compone de las siguientes matrices homogéneas:

$$T_n^{n-1} = T_{rotación_z}(\theta) * T_{traslacion_x}(a) * T_{traslacion_z}(d) * T_{rotación_x}(\alpha) \quad (113)$$

Aplicar la matriz de transformación de la ecuación 113 hace que se relacione el plano n con el plano n-1. Esto significa que se ha incluido todas las rotaciones y desplazamientos hacia un plano en una sola matriz. Ahora bien, imagine que la rotación sobre el eje z la está haciendo un eslabón del robot Scara. Si se desea imprimir la forma que tiene el eslabón respecto al plano n-1 se debe utilizar únicamente la matriz de rotación, es decir:

$$puntos_{eslabon} = T_{rotacion_z} * forma_{eslabon} \quad (114)$$

La matriz de rotación hace lo mismo que se mostró anteriormente en la ilustración 97. Se posee un ángulo de rotación y se puede representar todos los puntos respecto al plano base luego de la rotación. Esto significa que para imprimir la forma de cada eslabón respecto al sistema base, no es necesario implementar cada una de las matrices que propone la convención DH.

Algo importante que se tiene en cuenta para la presentación de los robots en las interfaces, es la capacidad de graficar el robot conociendo únicamente la posición de los planos coordinados en los que se ubica cada eslabón. Las matrices de transformación homogénea permiten conocer la posición del origen de cada plano respecto al base. Mediante dichos puntos se pueden graficar líneas con las cuales se representa fácilmente la forma del robot. Un ejemplo de lo que se ha mencionado se ve en la ilustración 98. En donde se grafica la forma de un robot antropomórfico únicamente sabiendo las posiciones de los planos coordinados, de cada eslabón, respecto al marco de referencia:

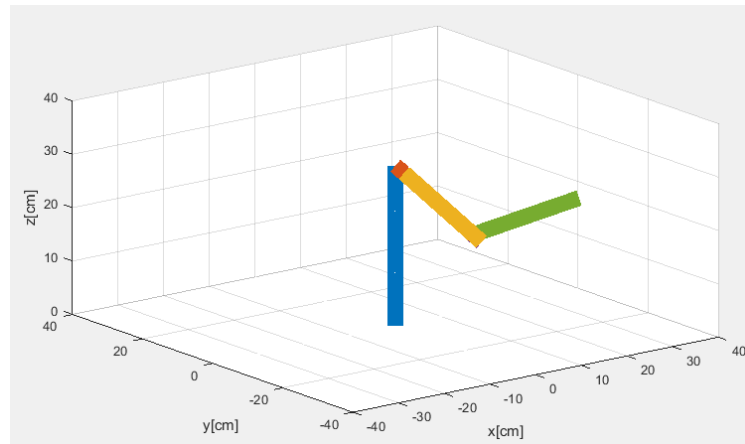


Ilustración 98 Representación de un robot Antropomórfico mediante líneas

Sin embargo, si se grafica la forma de los eslabones respecto al plano base, se puede obtener resultados como el siguiente:

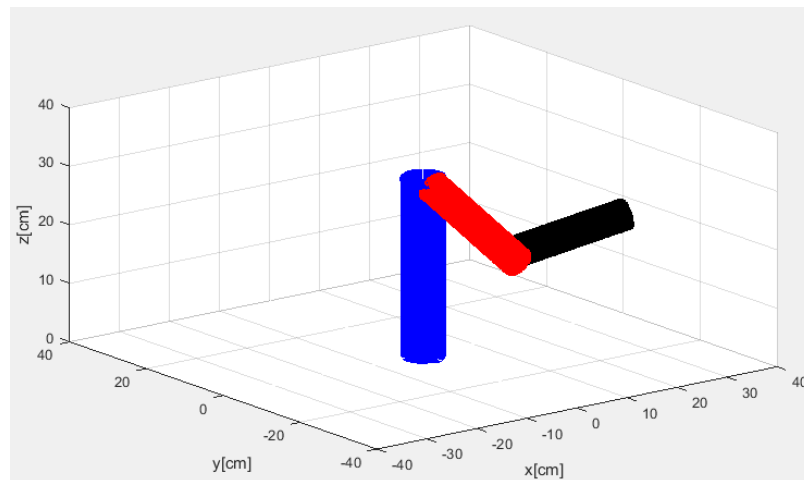


Ilustración 99 Representación de un robot antropomórfico implementando la forma de los eslabones.

Permitirle al programa cambiar esta configuración al momento de graficar los robots facilita que los computadores de bajo procesamiento puedan representar sin ningún problema el robot implementado.

4.3 CINEMÁTICA INVERSA

En este apartado se explica únicamente la cinemática inversa mediante el método geométrico. Se toma en cuenta que las funciones trigonométricas pueden producir dos resultados para los robots

con eslabones rotacionales. Y para finalizar con la sección de aprendizaje se explica el algoritmo Flood Fill modificado, con el cual pueden generar la planeación de trayectoria de cualquier robot móvil. En resumen, esta sección cuenta con los siguientes temas:

- Cinemática inversa para robot antropomórfico (RRR)
- Cinemática inversa para robot Scara (RRP)
- Cinemática inversa para robot Scara (PRR)
- Cinemática inversa para robot Cartesiano (PPP)
- Planeación de trayectoria mediante algoritmo Flood Fill modificado.

Se espera que mediante todos los temas tratados en la sección de aprendizaje se logre crear las bases suficientes para que cualquier estudiante logre desenvolverse en el mundo de la robótica. Éste es el gran aporte que se desea ofrecer a la universidad y a los estudiantes interesados.

Ahora se continúa presentando las interfaces que permiten crear la simulación de cada uno de los robots mencionados. En esta sección el software se encarga únicamente de leer datos y calcular trayectorias para simular los desplazamientos de cada uno de los eslabones implicados.

4.4 SIMULAR ROBOT

La interfaz que se muestra a continuación es la encargada de controlar la selección del robot y su respectiva simulación.

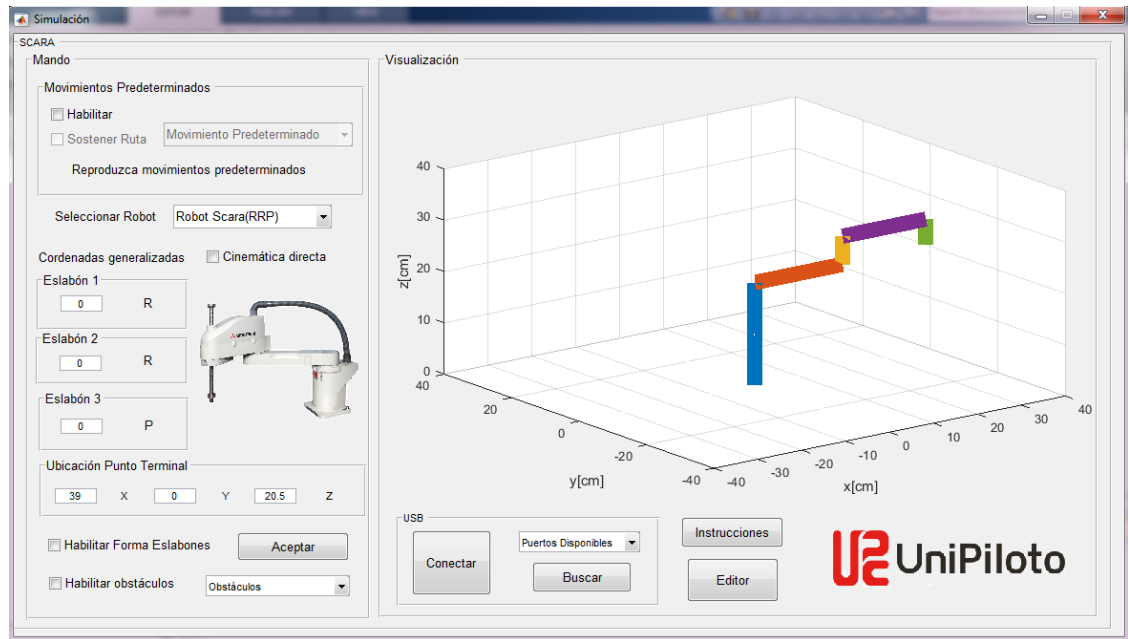


Ilustración 100 Simulación de robot Scara (PRR)

A continuación, en la ilustración 98 se ha dividido la interfaz en secciones para explicar la función que cumplen.

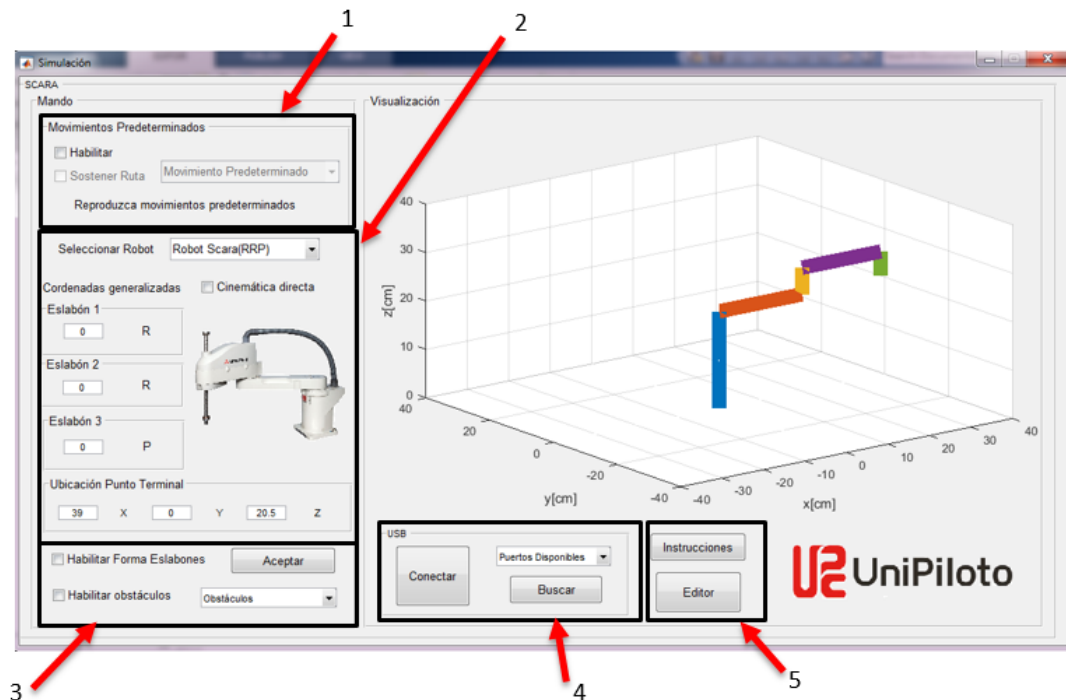


Ilustración 101 Secciones de la interfaz.

- 1- Permite al usuario cargar trayectorias predefinidas para simularlas con el robot graficado o implementarlas en físico con uno conectado vía USB. Los datos que se muestran en el menú emergente se pueden habilitar mediante la casilla de verificación que contiene la palabra “Habilitar”. Esta sección sólo carga las trayectorias que han sido especificadas en la sección “Editor” para incluirlas al momento de iniciar la simulación mediante el pulsador “Aceptar”. las trayectorias contienen información sobre el valor que deben tomar las coordenadas generalizadas, el estado (encendido o apagado) del actuador final y el tiempo que debe esperar para continuar con la siguiente posición. Un ejemplo de la información que puede tener cada trayectoria, para el robot antropomórfico, se muestra a continuación:

Tabla 9 Ejemplo de la información que se almacena para la trayectoria

	Coordenada generalizada1 [grados]	Coordenada generalizada2 [grados]	Coordenada generalizada3 [grados]	Estado actuador final [booleano]	Tiempo de espera [ms]
B	0	0	0	0	1000
á	90	45	-45	1	2000
s	0	45	-45	0	2000
i					
c					

amente los datos provienen de una matriz que contiene cinco columnas. Únicamente se debe conocer a que eslabón pertenece cada una de estas para poder entender el movimiento. Lo anterior se explica más adelante cuando se muestre la forma en la que se grafican los robots, ya que se aborda la cinemática directa de cada uno de estos.

- 2- Se encarga de seleccionar el robot con el cual se desea trabajar y muestra un ejemplo del tipo de robot escogido. El menú emergente permite seleccionar el robot cartesiano, antropomórfico, scara(PRR) y Scara(RRP). La casilla de verificación permite implementar la cinemática inversa o directa, por lo que dependiendo al estado de este objeto se habilita la escritura de las coordenadas generalizadas o la ubicación del punto terminal del robot. Además de esto, al momento de seleccionar el robot el programa especifica mediante una letra la naturaleza del eslabón. Es decir, indica si este es rotacional o prismático mediante una “R” o una “P” respectivamente. A continuación, se presenta la forma en la que el programa grafica cada uno de los robots:

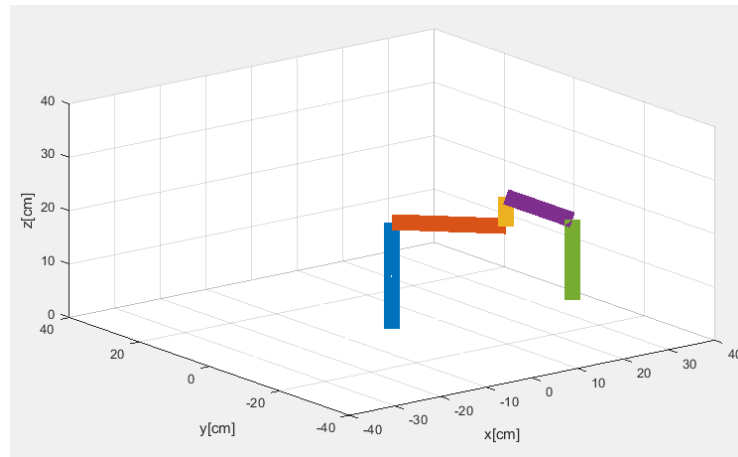


Ilustración 102 Robot Scara (RRP)

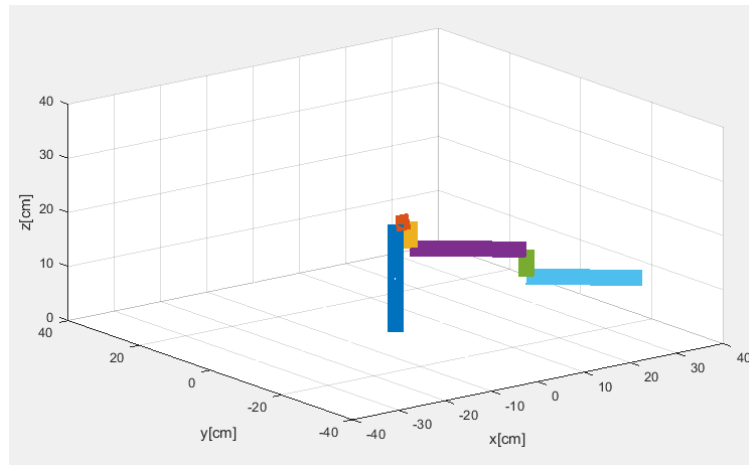


Ilustración 103 Robot Scara (PRR)

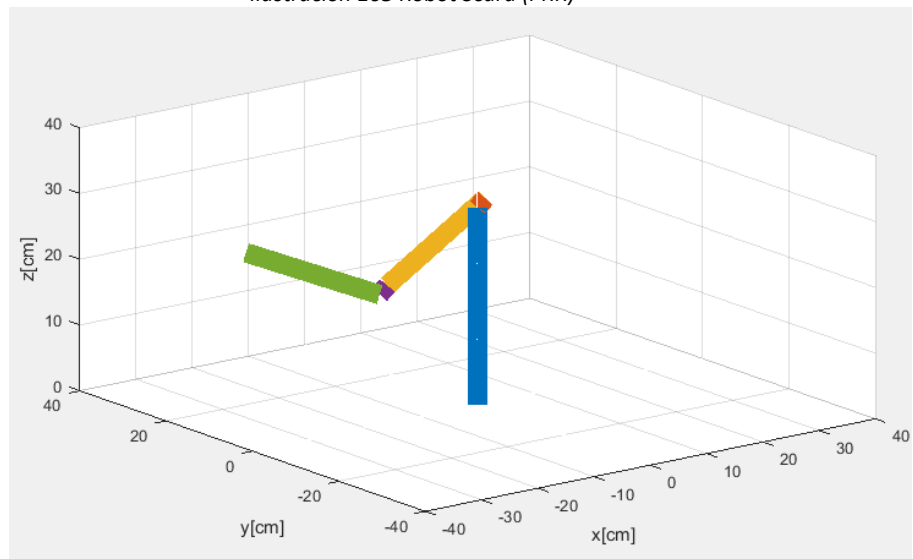


Ilustración 104 Robot Antropomórfico (RRR)

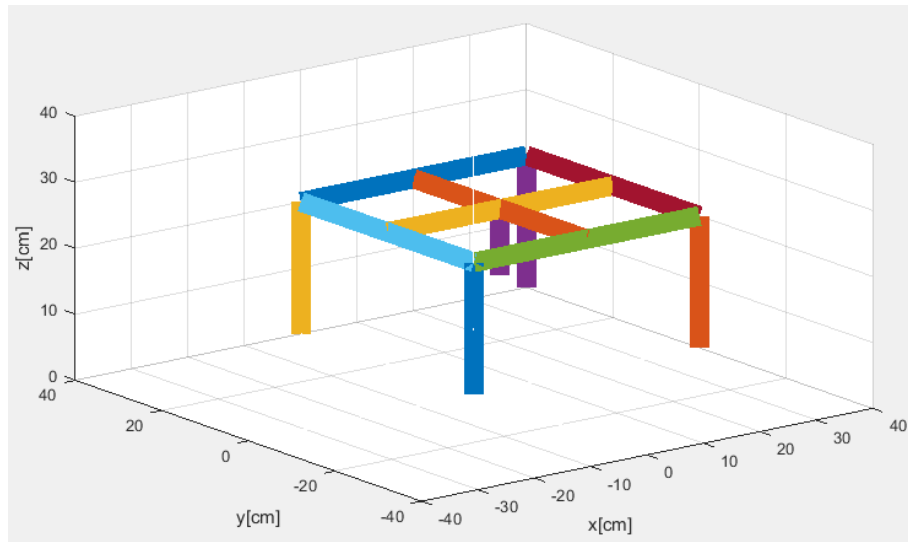


Ilustración 105 Robot Cartesiano (PPP)

- 3- Se encarga de habilitar la implementación de todos los puntos que representan formas de eslabones u obstáculos del entorno operativo. Esto implica aumentar el procesamiento de una gran cantidad de datos, ya que las gráficas anteriores únicamente implementan la ubicación de los planos coordenados, respecto al base, para crear líneas que conectan todo el robot. Los robots se visualizan de la siguiente manera si se implementan los obstáculos y la forma de todos los eslabones:

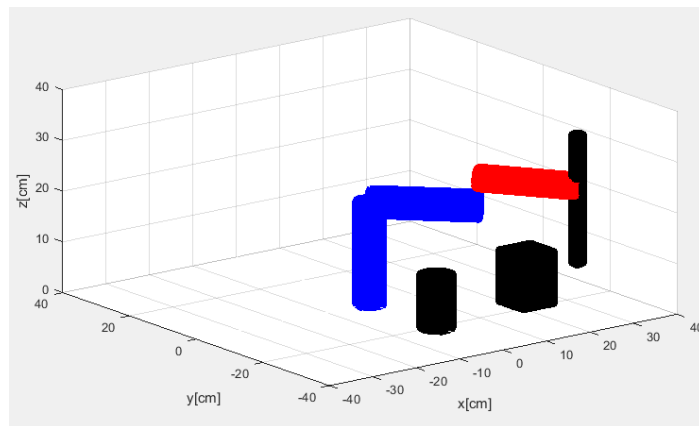


Ilustración 106 Robot Scara (RRP)

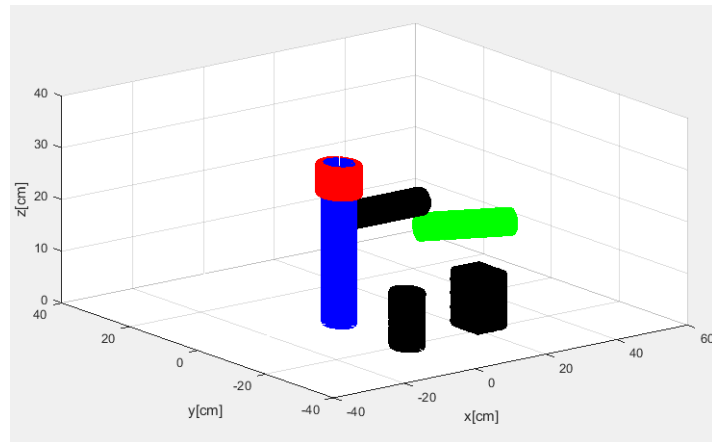


Ilustración 107 Robot Scara (PRR)

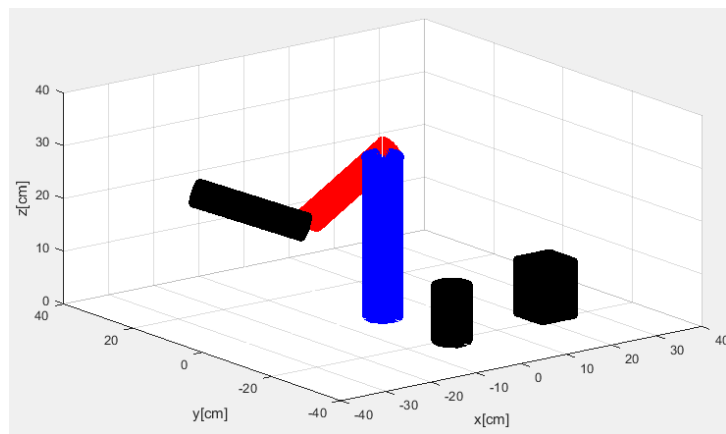


Ilustración 108 Robot Antropomórfico (RRR)

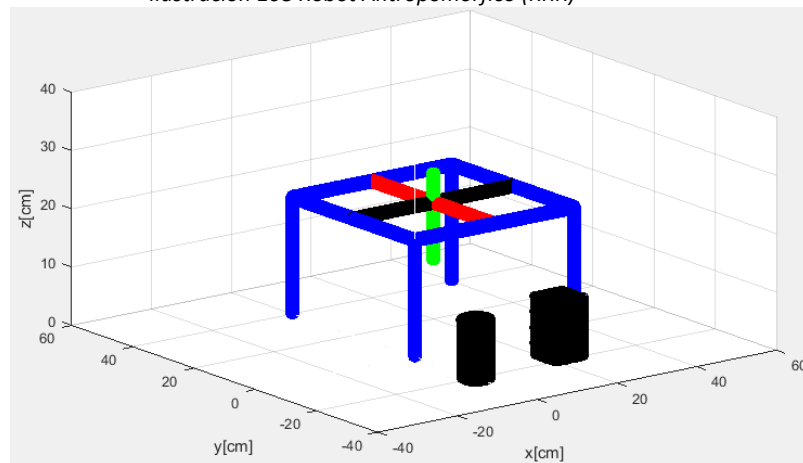


Ilustración 109 Robot Cartesiano (PPP)

- 4- Habilita la conexión USB para que el usuario envíe datos a cualquier placa electrónica que controla alguno de los robots presentados anteriormente. Cada dato que envía el

programa contiene información sobre el valor que debe adquirir cada coordenada generalizada y el estado en el que se encuentra el actuador final. Un ejemplo se muestra a continuación:

String dato = "40,20,30,1"+"\n";

Dato es una cadena de caracteres la cual contiene información, separa mediante comas, que representa el valor que debe tomar cada coordenada generalizada. La variable finaliza con el carácter de fin de línea para indicar que se ha llegado al final del dato y así permitirle al microcontrolador finalizar la lectura del puerto serial, para iniciar el movimiento de los motores.

Una vez se ha enviado el dato, el software espera recibir por parte de la placa un “ok” que le indique que los motores han llegado a su referencia, para continuar con la siguiente posición. Al igual que la variable dato, la recepción del “ok” debe venir con el carácter de nueva línea.

Para mostrar el funcionamiento se conecta una placa “Arduino uno” para realizar la búsqueda del puerto y generar la conexión.

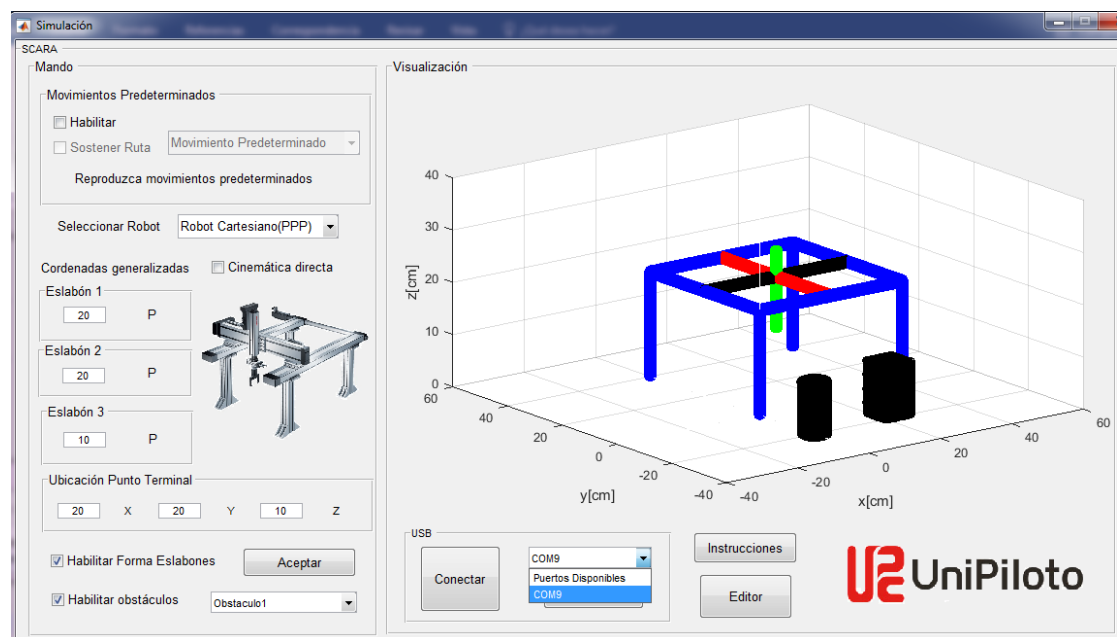


Ilustración 110 Conexión de placa Arduino uno al puerto USB

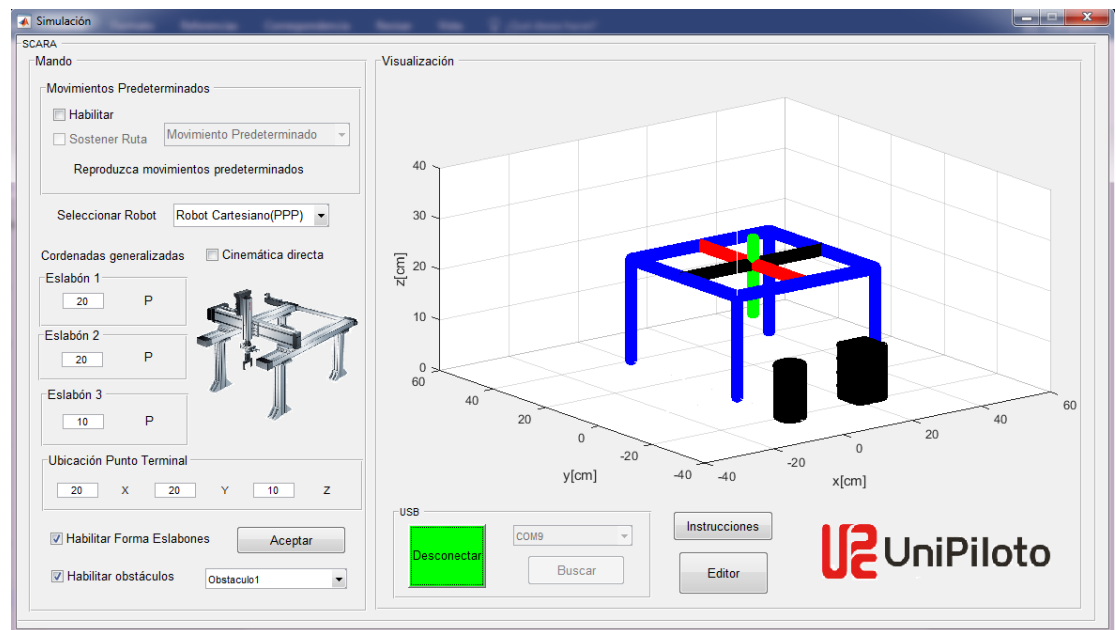
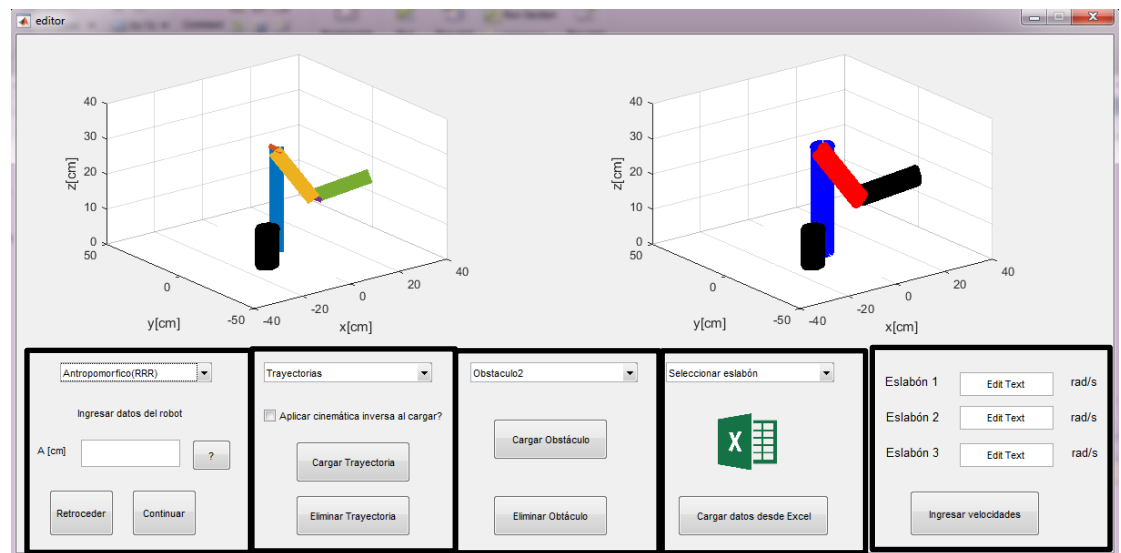


Ilustración 111 Conexión exitosa entre la placa y el software.

Una vez se ha realizado la conexión entre la placa y el objeto virtual de aprendizaje, cada valor calculado para las coordenadas generalizadas es enviado al puerto serial. Por lo que es supremamente importante seleccionar el robot adecuado.

- 5- Se encarga de explicar el funcionamiento del software y editar las variables que implementa el simulador para poder funcionar. A continuación, se presenta la interfaz que se encarga de manipular toda la información que puede ingresar el usuario.



Selecciona el robot y almacena las dimensiones de este teniendo en cuenta las restricciones físicas

Carga trayectorias predeterminadas desde Excel

Carga obstáculos desde Excel

Carga forma de eslabones desde Excel

Carga velocidades

Ilustración 112 Interfaz editora.

La sección encargada de almacenar las dimensiones del robot teniendo en cuenta las restricciones físicas contiene un pulsador con el símbolo “?” con el cual puede mostrar imágenes que indican que significa el dato que se está pidiendo. Por ejemplo, para el robot Scara (RRP) el pulsador arrojaría la siguiente imagen:

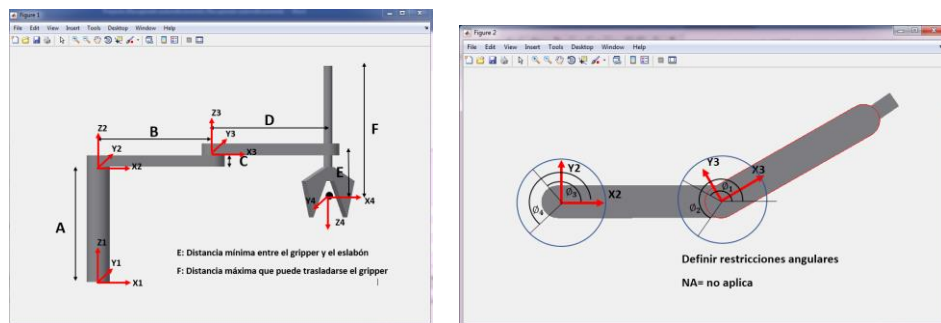


Ilustración 113 Imagen de apoyo para entender los datos requeridos.

Una vez se ha ingresado todos los datos del robot, el estudiante ya ha configurado todo lo necesario para empezar a realizar pruebas con los robots mencionados. Justo después de este paso puede empezar a realizar rutinas que le permitan manipular objetos que se encuentren en el entorno operativo del robot. Si el actuador final posee un gripper el cual sostiene un esfero, basta con ingresar puntos que representen la forma de una letra para realizar la actividad de escritura. Si por el contrario posee un láser, se pueden utilizar los mismos puntos teniendo en cuenta el estado de activación del láser, para que solamente grabe el contorno de la letra.

La interfaz de simulación únicamente implementa la cinemática directa e inversa para poder crear el movimiento del robot. A continuación, se muestran las matrices homogéneas con las cuales se crea la cinemática directa de cada robot y posteriormente se indica su cinemática inversa.

4.5 ROBOT ANTROPOMÓRFICO (RRR)

Para el robot antropomórfico se utilizan los ejes coordenados que se muestran en la ilustración 114. Se poseen 3 grados de libertad que se han indicado en la imagen mediante una flecha circular, ya que son de naturaleza rotacional.

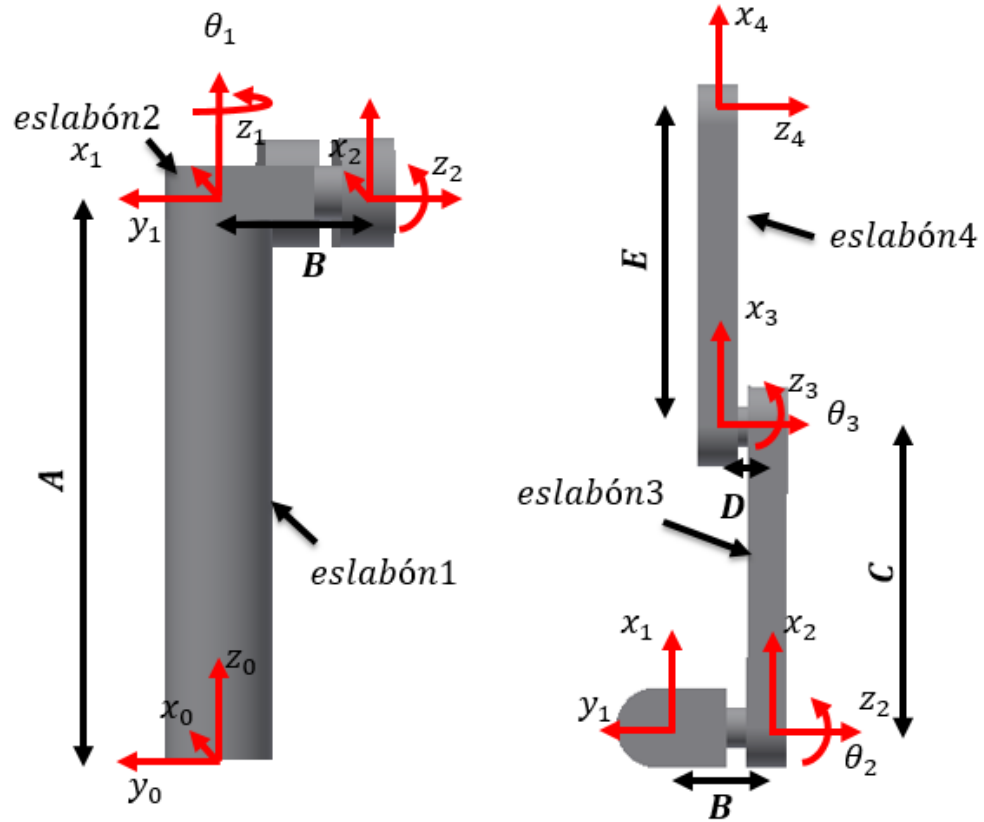


Ilustración 114 Ejes coordenados implementados en el robot Antropomórfico

Las matrices homogéneas que relacionan los diferentes eslabones se muestran a continuación:

Para relacionar el sistema coordenado 1 relativo al 0 se debe hacer una traslación en el eje z de magnitud “A” y luego una rotación en el eje z. La rotación es el primer grado de libertad del sistema.

$$H_0^1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ A \\ 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & -\sin(\theta_1) & 0 \\ \sin(\theta_1) & \cos(\theta_1) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (115)$$

Luego ocurre una rotación en el eje x de 90 grados, para ajustar la dirección del eje z en el mismo sentido en el que rota el siguiente eslabón. Posterior a esto ocurre una traslación de magnitud “B” y una rotación en el eje z.

$$H_1^2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) & -\sin\left(\frac{\pi}{2}\right) \\ 0 & \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) & \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ B \\ 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta_2) & -\sin(\theta_2) & 0 \\ \sin(\theta_2) & \cos(\theta_2) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (116)$$

Para relacionar el sistema coordenado 3 respecto al 2 se debe realizar una traslación en el eje “x” y “y” de magnitud C y D respectivamente. Para finalizar con una rotación en el eje z, que es el tercer grado de libertad.

$$H_2^3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & C \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -D \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta_3) & -\sin(\theta_3) & 0 \\ \sin(\theta_3) & \cos(\theta_3) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (117)$$

La última matriz permite ubicar la posición del actuador final respecto al sistema coordenado 3, esto se logra simplemente generando una traslación en el eje x de magnitud “E”.

$$H_3^4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & E \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (118)$$

Una vez se tienen todas las matrices homogéneas se puede aplicar la composición de matrices para poder relacionar todos los ejes coordenados respecto al sistema base (sistema 0) y así transformar cualquier punto, que sea visto desde cualquier sistema coordenado, respecto al base. Los puntos pueden representar el origen de un sistema coordenado o la forma de un eslabón del mecanismo, por lo que se tiene la posibilidad de graficar al robot de una manera muy exacta o simplemente graficar líneas que conecten el origen de cada sistema coordenado. Para aclarar lo anterior se presentan las ecuaciones que permiten hacer esto:

$$puntos_{1_0} = puntos_{eslabón1} \quad (119)$$

$$puntos_{2_0} = H_0^1 \cdot puntos_{eslabón2} \quad (120)$$

$$puntos_{3_0} = H_0^1 \cdot H_1^2 \cdot puntos_{eslabón3} \quad (121)$$

$$puntos_{4_0} = H_0^1 \cdot H_1^2 \cdot H_2^3 \cdot puntos_{eslabón4} \quad (122)$$

$$posicion_{actuador_0} = H_0^1 \cdot H_1^2 \cdot H_2^3 \cdot H_3^4 \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (123)$$

Cada una de las ecuaciones anteriores permite trasladar puntos, que son vistos desde algún sistema coordenado, al sistema base. Si no se posee la forma de los eslabones, se puede reemplazar los puntos por uno que esté en el origen del plano con las coordenadas (0,0,0). De esta manera se pose la ubicación de cada sistema coordenado para graficar líneas que conecten las articulaciones del robot, generando gráficas como las mostradas en las figuras 92 a 105.

La cinemática inversa, hallada mediante el método geométrico por las referencias (2) (10), para el robot antropomórfico es:

$$\theta_1 = \tan^{-1}\left(\frac{t_y}{t_x}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{-B + D}{\sqrt{t_y^2 + t_x^2 - (-B + D)^2}}\right) \quad (124)$$

$$\theta_2 = \tan^{-1}\left(\frac{t_z - A}{\sqrt{t_y^2 + t_x^2 - (-B + D)^2}}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{E * \sin\theta_3}{C + E * \cos\theta_3}\right) \quad (125)$$

$$M = \frac{t_x^2 + t_y^2 - (-B + D)^2 + (t_z - A)^2 - C^2 - E^2}{2 * C * E} \quad (126)$$

$$\theta_3 = \tan^{-1} \left(\frac{\pm \sqrt{1 - M^2}}{M} \right) \quad (127)$$

A la deducción de la literatura se le ha agregado las variables con las que se dimensiona el robot en este texto, los parámetros (t_x, t_y, t_z) representan las coordenadas a las cuales se desea ubicar el actuador final del robot en los ejes (x, y, z) respectivamente. Las variables “A”, “B” y “D” deben ser medidas con un signo positivo si se encuentran como se ha indicado en la ilustración 114, de lo contrario es necesario agregar el dato en la ecuación con un signo negativo.

El software Matlab permite implementar la función “ATAN2(y,x)”, la cual calcula el arco tangente teniendo en cuenta que el resultado puede encontrarse en los cuatro cuadrantes del plano cartesiano. Esto evita obtener ángulos incorrectos que no representan la cinemática inversa del robot. Se debe prestar atención al signo variante de la raíz cuadrada en la ecuación 127, ya que modificar el signo permite obtener las dos soluciones posibles de la cinemática inversa. Este aspecto es de gran importancia para el algoritmo que genera la planeación de trayectoria del robot fijo debido a que el robot puede llegar a un mismo punto de dos maneras distintas, por lo que el algoritmo debe indicar de qué manera llegar teniendo en cuenta que debe evitar obstáculos.

4.6 ROBOT SCARA (RRP)

A continuación, se presentan las matrices homogéneas del robot Scara (RRP) y posteriormente su cinemática inversa, la cual no difiere mucho respecto a la del antropomórfico. Los eslabones se distribuyen como se muestra en la ilustración 115.

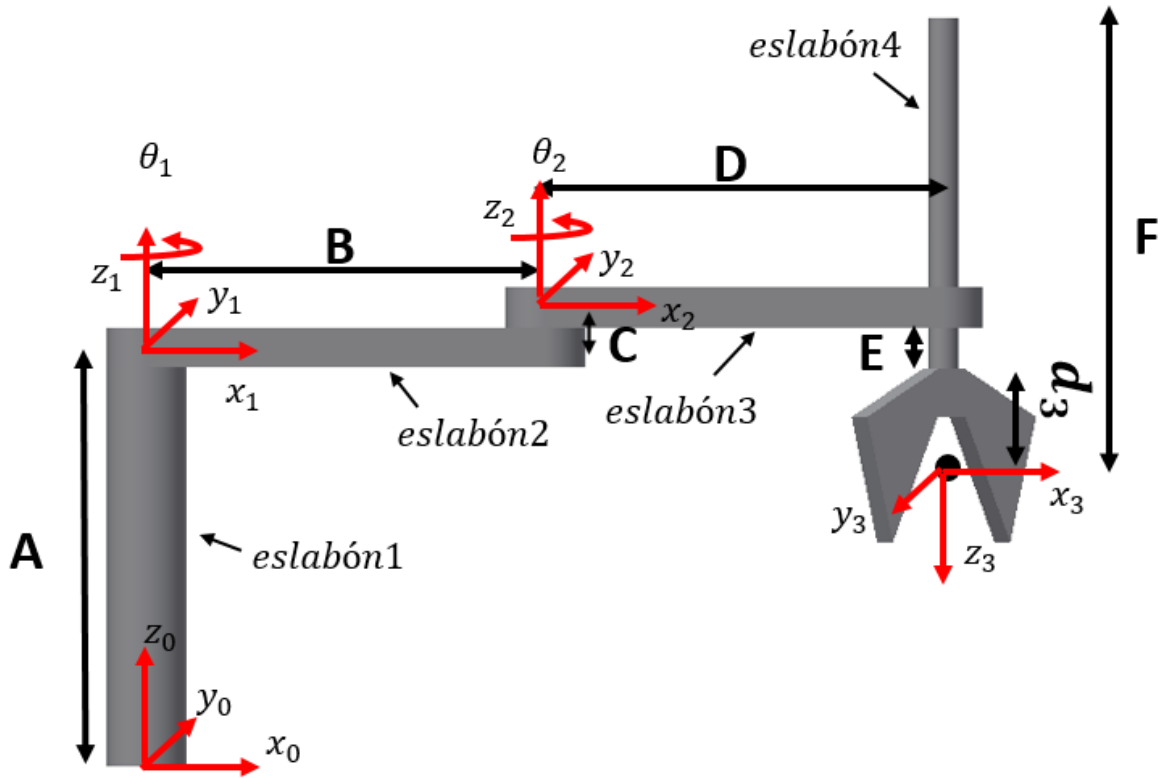


Ilustración 115 Configuración del robot Scara con 3-DOF.

Las coordenadas generalizadas del robot son θ_1, θ_2 y d_3 . Mediante estas tres se permite ubicar el actuador final en cualquier posición del área de trabajo del robot. La dimensión "E" es la distancia mínima a la que puede estar el actuador final respecto al eslabón 3.

Las matrices homogéneas para relacionar los ejes coordenados se muestran a continuación:

Se debe realizar una traslación de magnitud A en el eje Z_0 y posteriormente una rotación θ_1 sobre el mismo eje.

$$H_0^1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ A \\ 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & -\sin(\theta_1) & 0 \\ \sin(\theta_1) & \cos(\theta_1) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (128)$$

Luego se genera una traslación de magnitud “B” y “C” en los ejes x_1 y z_1 para ubicar el origen del eslabón 3. Posteriormente se introduce el segundo grado de libertad mediante una rotación θ_2 sobre el eje z_2 .

$$H_1^2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B \\ 0 \\ C \\ 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta_2) & -\text{sen}(\theta_2) & 0 \\ \text{sen}(\theta_2) & \cos(\theta_2) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (129)$$

En la última matriz homogénea se genera una rotación de 180° sobre el eje x_2 para ajustar la dirección del eje z_3 en el mismo sentido que ocurre del desplazamiento d_3 . Finalmente se generan los desplazamientos “D” y “E+d₃” para ubicar el origen del sistema coordenado 3 en el punto de referencia del actuador final.

$$H_2^3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\pi) & -\text{sen}(\pi) \\ 0 & \text{sen}(\pi) & \cos(\pi) \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D \\ 0 \\ E + d_3 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (130)$$

La cinemática inversa es:

$$\theta_1 = \tan^{-1}\left(\frac{t_y}{t_x}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{D * \text{sen}\theta_2}{B + D * \cos\theta_2}\right) \quad (131)$$

$$M = \frac{t_x^2 + t_y^2 - B^2 - D^2}{2 * B * D} \quad (132)$$

$$\theta_2 = \tan^{-1} \left(\frac{\pm \sqrt{1 - M^2}}{M} \right) \quad (133)$$

$$d_3 = A + C - E - t_z \quad (134)$$

El desplazamiento del actuador final mediante la articulación prismática se toma positiva si la traslación se da en mismo sentido que apunta el eje z_3 , mientras que los desplazamientos angulares son positivos si la rotación se da en el sentido contrario de las manecillas del reloj.

Al igual que el robot antropomórfico, se usan las matrices homogéneas para graficar la forma del robot o determinar la posición de cada sistema coordenado y así graficar líneas que le den la forma al robot. A continuación, se muestra el robot Scara el cual posee una articulación prismática justo en la base de la estructura.

4.7 ROBOT SCARA (PRR)

El robot Scara cuya primera articulación es prismática se muestra en la figura 116. la dimensión "G" representa la distancia mínima a la que puede estar el eslabón 2 respecto al suelo.

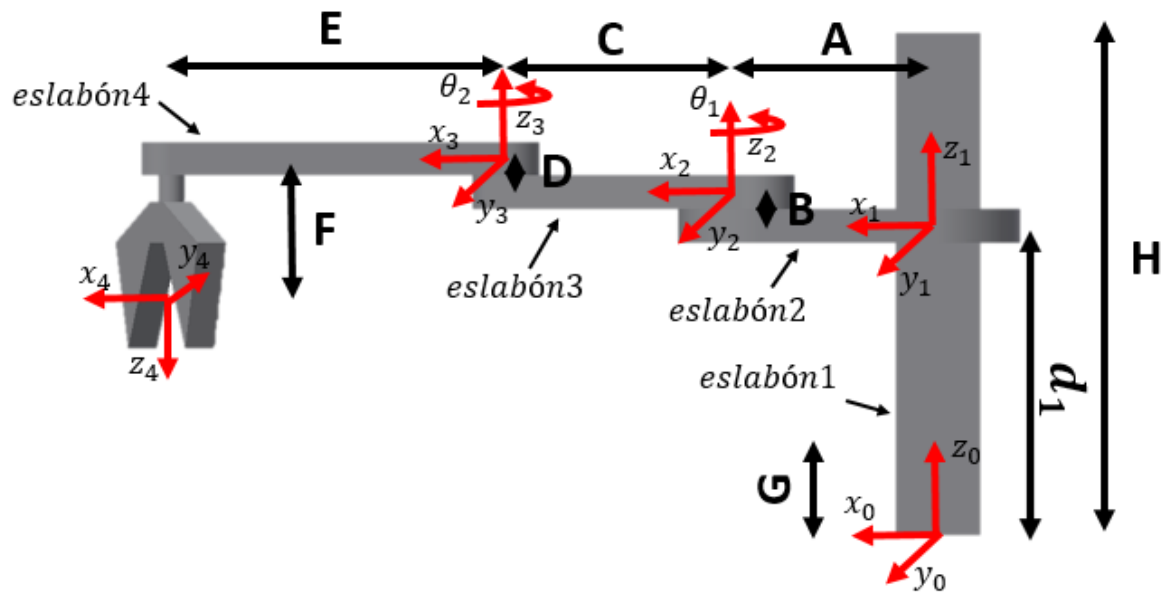


Ilustración 116 Robot Scara (PRR)

Las matrices homogéneas necesarias para relacionar todos los sistemas coordenados se muestran a continuación, se sigue el mismo procedimiento de traslación y rotación como en los anteriores robots:

Como se mencionó anteriormente la primera coordenada generalizada es la variable d_1 , esta permite el desplazamiento del eslabón 2 sobre el eslabón1 sobre el eje z, por lo que la primera matriz homogénea es:

$$H_0^1 = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ d_1 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & 1 \end{bmatrix} \quad (135)$$

luego se implementa una matriz de traslación con las variables “A” y “B” para generar un desplazamiento sobre los ejes x_1 y z_1 . Luego se agrega la rotación sobre el eje z_2 mediante la variable θ_1 .

$$H_1^2 = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} A \\ 0 \\ B \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & -\sin(\theta_1) & 0 \\ \sin(\theta_1) & \cos(\theta_1) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & 1 \end{bmatrix} \quad (136)$$

Se realiza nuevamente el paso anterior para ubicar el sistema 3 respecto al dos.

$$H_2^3 = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} C \\ 0 \\ D \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\theta_2) & -\sin(\theta_2) & 0 \\ \sin(\theta_2) & \cos(\theta_2) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & 1 \end{bmatrix} \quad (137)$$

Finalmente se alinea el eje z de tal manera que apunte en el mismo sentido que el gripper y se realiza el respectivo desplazamiento hacia el punto de referencia del gripper.

$$H_3^4 = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\pi) & -\sin(\pi) \\ 0 & \sin(\pi) & \cos(\pi) \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} E \\ 0 \\ F \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & 1 \end{bmatrix} \quad (138)$$

La cinemática inversa para el robot Scara(PRR) es:

$$d_1 = t_z + F - D - B \quad (139)$$

$$\theta_1 = \tan^{-1}\left(\frac{t_y}{t_x - A}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{E * \sin\theta_2}{C + E * \cos\theta_2}\right) \quad (140)$$

$$M = \frac{(t_x - A)^2 + t_y^2 - E^2 - C^2}{2 * E * C} \quad (141)$$

$$\theta_2 = \tan^{-1}\left(\frac{\pm\sqrt{1 - M^2}}{M}\right) \quad (142)$$

4.8 ROBOT CARTESIANO (PPP)

El robot cartesiano es el más sencillo de todos debido a que sus articulaciones son netamente prismáticas, lo que hace que las matrices homogéneas y la cinemática inversa no tenga gran complejidad. Sin embargo, se presentan a continuación para ver las ecuaciones que implementa el software para la simulación de este robot.

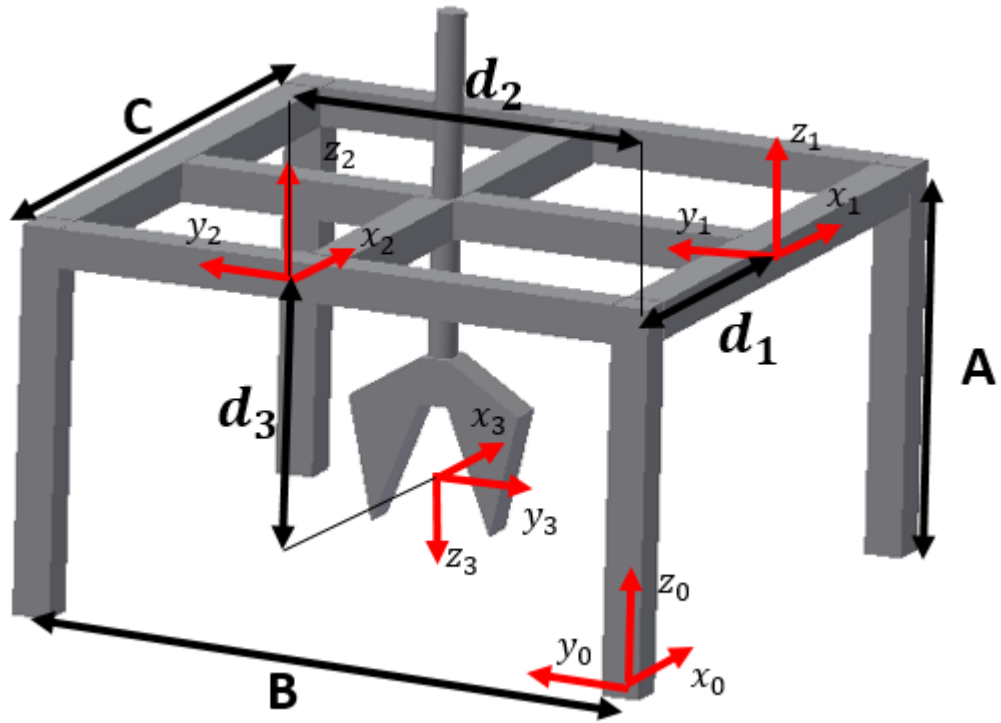


Ilustración 117 Robot Cartesiano(PPP)

Las matrices homogéneas son:

$$H_0^1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_1 \\ 0 \\ A \\ 1 \end{bmatrix} \quad (143)$$

$$H_1^2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -d_1 \\ d_2 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (144)$$

$$H_2^3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\pi) & -\sin(\pi) \\ 0 & \sin(\pi) & \cos(\pi) \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ d_3 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (145)$$

La cinemática inversa es:

$$d_1 = t_x \quad (146)$$

$$d_2 = t_y \quad (147)$$

$$d_3 = A - t_z \quad (148)$$

Las variables “B” y “C”, las cuales no fueron incluidas en la cinemática directa, son implementadas para graficar la estructura en caso de no tener los puntos que representan al robot. Además de esto, las medidas sirven como restricciones para el actuador final y le impiden que este se desplace más allá del área de trabajo permitida.

En resumen, el software creado se encarga de manipular el ingreso de todas aquellas variables que dimensionan al robot, luego de esto implementa la cinemática inversa y directa para calcular las coordenadas generalizadas e imprimir la forma del robot en la gráfica. Si un dispositivo se encuentra conectado, cada vez que se modifique una coordenada generalizada, se manda los datos vía serial.

5. DISEÑO DEL ALGORITMO DE PLANEACIÓN DE TRAYECTORIA PARA EL ROBOT SCARA

5.1 RESUMEN DEL CAPÍTULO

En este capítulo del documento se implementa uno de los algoritmos más importantes en la planeación de trayectoria de robots móviles (Flood Fill) **(26; 9)** para determinar la trayectoria de un robot SCARA, el cual es simulado en el software Matlab. La deducción que se presenta a continuación permite ser aplicada a los principales robots que se pueden encontrar en la industria,

generando trayectorias que buscan reducir el desplazamiento, teniendo en cuenta que hay presencia de obstáculos y restricciones físicas. Los resultados obtenidos indican que es posible calcular la ruta a cualquier punto del espacio de trabajo, siempre y cuando ésta sea físicamente posible. Por lo que este análisis se puede expandir a los robots más implementados en la enseñanza de robótica como lo son el antropomórfico y el cartesiano.

El algoritmo que se explica a continuación sólo se puede entender una vez se comprenda el flood fill y la versión modificada que se propone para permitir aplicarse en robots fijos. Por lo que se debe explicar dicha modificación teniendo presente los conceptos más básicos de la robótica, como lo son la cinemática directa e inversa.

5.2 ALGORITMO FLOOD FILL

El algoritmo Flood Fill se basa en la representación matricial de un mundo continuo. En dicha matriz cada celda es una posición a la cual se puede mover el robot, siempre y cuando la traslación a dicha matriz no produzca una colisión con un obstáculo.

El robot móvil debe caber en cada celda de la matriz y debe desplazarse en ellas siempre y cuando no choque con un obstáculo ubicado en las paredes de las celdas. Antes de iniciar el desplazamiento del robot, las celdas de la matriz se inicializan sin valor alguno. Entonces, a éstas se les asigna un valor según la cantidad de pasos necesarios desde el origen del robot para ser alcanzadas.



Ilustración 118. Representación matricial del entorno (27)

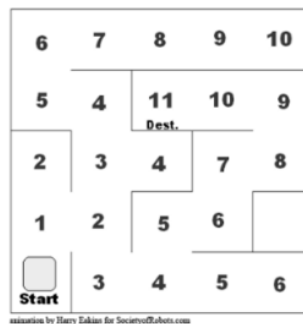


Ilustración 119. Llenado de la representación matricial del entorno (27)

Suponga que se posee un mundo el cual su representación matricial está dada por la ilustración 118. El inicio del robot se encuentra en “Start” y su primer movimiento únicamente puede ser vertical, debido a los obstáculos que lo rodean. Una vez el robot genera su primer movimiento éste marca la posición de dicha celda con un valor de 1, debido a que es su primer movimiento.

Si se repite esto iteradamente teniendo en cuenta los demás obstáculos, se puede llegar a asignar un valor a cada celda de la matriz como se ilustra en la ilustración 120.

Luego de once iteraciones se nota que la celda “destino” se ha alcanzado. Esto significa que es momento de hallar la trayectoria a partir del valor asignado a cada celda de la matriz. La ilustración 120 muestra este paso.

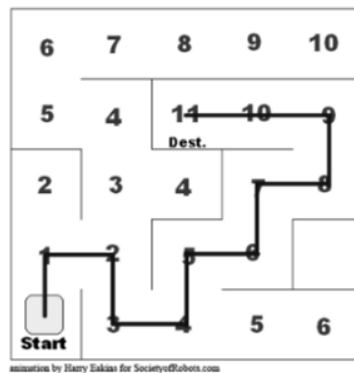


Ilustración 120. Trayectoria solucionada del Flood Fill (27).

Para poder solucionar trayectorias de un robot Fijo, como el robot Scara, es necesario modificar el algoritmo Flood Fill para permitir evaluar los obstáculos como información dentro de las celdas de la matriz. Es decir, los obstáculos no serán incluidos en los extremos de la celda, sino como un dato que se encuentra almacenado internamente.

En la ilustración 121, se presenta un mundo en donde el objeto rojo debe llegar al objeto verde, evitando chocar con los objetos de color azul. Si se discretiza la posición de cada objeto y se encierran en celdas, es posible crear una matriz que contenga información de los obstáculos, del robot y del punto deseado. Lo anterior se muestra en la ilustración 122.

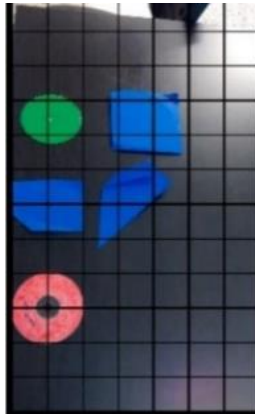


Ilustración 121. Obtención del mundo continuo

0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
-3	-3	-1	-1	-1	0	0
-3	-3	-1	-1	-1	0	0
-3	-3	-1	-1	-1	0	0
-1	-1	-1	-1	-1	0	0
-1	-1	-1	-1	0	0	0
0	0	-1	0	0	0	0
-2	-2	0	0	0	0	0
-2	-2	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0

Ilustración 122. Representación discreta del mundo continuo

Las posiciones del robot se almacenan con un valor de -2, la de los obstáculos con un valor de -1 y la del destino con un valor de -3.

Para solucionar la trayectoria del robot (objeto rojo) se elimina de la matriz todos los valores -2 excepto uno, que se utilizará de referencia. Quedando la matriz de la ilustración 123.

0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
-3	-3	-1	-1	-1	0	0
-3	-3	-1	-1	-1	0	0
-3	-3	-1	-1	-1	0	0
-1	-1	-1	-1	-1	0	0
-1	-1	-1	-1	0	0	0
0	0	-1	0	0	0	0
-2	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0

Ilustración 123. Eliminación de los extremos del robot en la matriz (Excepto un valor usado de referencia)

Ahora se procede a realizar el llenado de la matriz de la misma manera como explicó en el Flood Fill, excepto que ahora las colisiones deben ser evaluadas mediante la intersección de los extremos del robot en celdas marcadas con el valor de -1. Luego de 19 iteraciones se observa en

la ilustración 124 que el robot entra en contacto con celdas marcadas con el valor de -3, lo que da a entender que se ha llegado al punto deseado. Todas las celdas que han quedado con un valor de cero representan una posición a la cual el punto de referencia no puede llegar, ya que los extremos del robot chocarían con obstáculos o se saldrían de la matriz.

18	17	16	15	14	13	0
19	0	0	0	0	12	0
-3	-3	-1	-1	-1	11	0
-3	-3	-1	-1	-1	10	0
-3	-3	-1	-1	-1	9	0
-1	-1	-1	-1	-1	8	0
-1	-1	-1	-1	6	7	0
1	0	-1	4	5	6	0
-2	1	2	3	4	5	0
1	2	3	4	5	6	0
2	3	4	5	6	7	0
0	0	0	0	0	0	0

Ilustración 124. Llegada del robot al punto deseado

A continuación, se procede a determinar la trayectoria del robot de la misma manera como se hizo en el Flood Fill, resultando la ilustración 125.

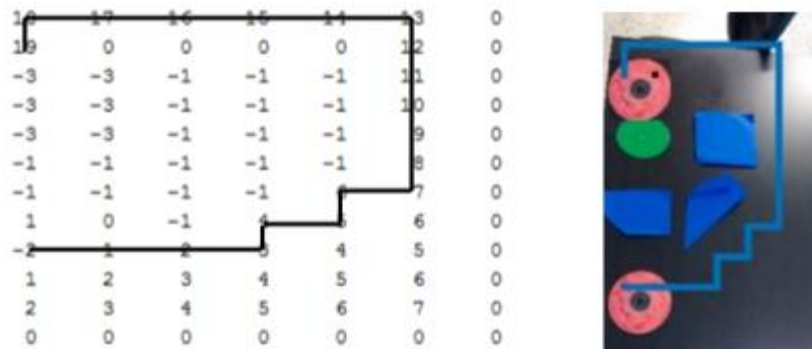


Ilustración 125. Solución a la trayectoria del robot móvil

Es importante entender que el algoritmo no está limitado a un desplazamiento en un único plano, el robot puede tener desplazamientos comprendidos en los tres ejes coordenados (x, y, z) y así de esta manera resolver trayectorias tridimensionales. Esto significa que, si se posee de alguna manera la posición de todos los objetos de un entorno operativo, se puede generar la planeación de trayectoria de robots terrestres, aéreos o acuáticos. Para un caso tridimensional se muestra la ilustración 126, en donde se ha graficado todos los obstáculos de color negro. Se ha dispuesto dos imágenes en donde la primera contiene los obstáculos y la segunda no, con el fin de mostrar claramente la trayectoria calculada. Recuerde que el desplazamiento del robot únicamente puede estar comprendido en la matriz que lo contiene, por esta razón el robot no puede desplazarse de una manera más corta. Si el robot entra a posiciones negativas de la gráfica, significaría que está atravesando un muro, el cual limita el entorno operativo del robot.

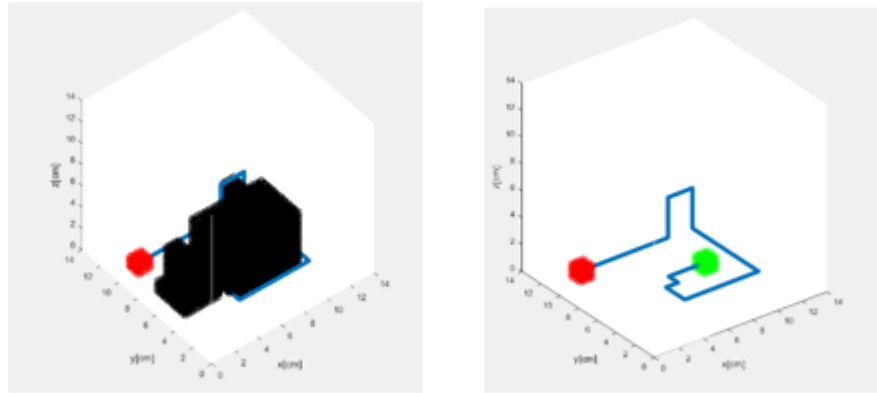


Ilustración 126. Trayectoria tridimensional del algoritmo

Los pasos implementados, que llevaron a la ilustración 126, son indispensables para entender la planeación de trayectoria de un robot fijo. Del algoritmo anterior se observa que el primer paso fue discretizar el espacio de trabajo en una matriz, la cual contiene la ubicación del robot, de los obstáculos y de la posición deseada. En la siguiente sección se explica cómo hacerlo para los robots fijos.

5.3 REPRESENTACIÓN DISCRETA DEL ENTORNO OPERATIVO DE UN ROBOT FIJO

Se va a explicar el algoritmo para ser aplicado para un robot Scara(RRP). Por lo que se usarán las deducciones de la sección 4.6 para determinar la cinemática directa y por lo tanto la ubicación del robot en el espacio de trabajo. Antes de explicar, se recuerda que los pasos del algoritmo son igualmente aplicables para cualquier robot fijo con una cinemática inversa analítica.

La ilustración 127 muestra los ejes coordenados de cada eslabón para el robot Scara (RRP), el cual también se muestra en la sección 4.6. Se sabe que los puntos, que representan a cada eslabón, son vistos respecto al origen de cada eslabón. Por lo que para ver todos los puntos respecto al sistema base, es necesario utilizar las matrices homogéneas de las ecuaciones 128, 129 y 130.

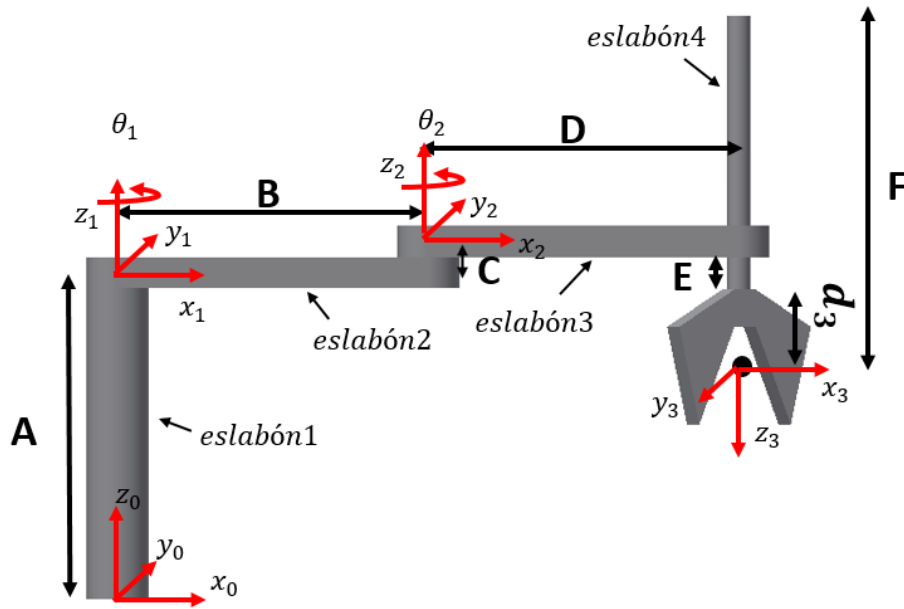


Ilustración 127. Robot Scara (RRP) y sus sistemas coordenados

Las coordenadas generalizadas para este robot son:

$$q = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ d_3 \end{bmatrix} \quad (149)$$

Para ubicar todos los puntos, que representan la forma de cada eslabón, respecto al sistema base se hace lo mismo que se explica en la sección 4.5 para el robot antropomórfico:

$$puntos_{1_0} = puntos_{eslabón1} \quad (150)$$

$$puntos_{2_0} = H_0^1 puntos_{eslabón2} \quad (151)$$

$$puntos_{3_0} = H_0^1 \cdot H_1^2 \cdot puntos_{eslabón3} \quad (152)$$

$$puntos_{4_0} = H_0^1 \cdot H_1^2 \cdot H_2^3 puntos_{eslabón4} \quad (153)$$

$$posición_{actuador_0} = H_0^1 \cdot H_1^2 \cdot H_2^3 \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (154)$$

Se supone que la trayectoria que se debe calcular evitará obstáculos, por lo tanto, es necesario incluir los obstáculos y determinar las matrices homogéneas respectivas. En este caso se supone que los obstáculos son vistos respecto al sistema coordenado "0", por lo que no es necesario hallar una matriz homogénea.

$$p_{obstáculos_0} = p_{obstáculos} \quad (155)$$

Ahora que es posible obtener los puntos respecto al sistema "0", se puede ingresar cualquier valor a las coordenadas generalizadas y graficar los resultados en un software, y así ver el entorno operativo del robot y su ubicación en éste. El resultado se muestra en la ilustración 128.

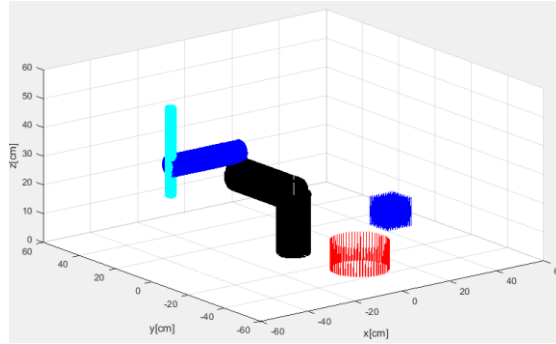


Ilustración 128. Entorno operativo del robot.

El siguiente paso es discretizar el entorno operativo en una matriz que contenga los valores del punto inicial, los obstáculos y el punto final con los valores -2, -1, -3 respectivamente. Se debe crear un nuevo sistema coordenado que se ubique en un extremo del espacio de trabajo del robot, teniendo en cuenta que la orientación del plano dirija los ejes coordenados hacia el robot origen del robot, como se ilustra en la ilustración 129.

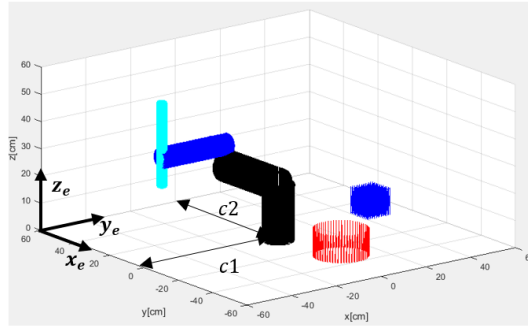


Ilustración 129. Creación nuevo sistema coordenado "e".

La matriz homogénea que relaciona el sistema "0" con el "e" es:

$$H_e^0 = \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) & -\sin\left(\frac{\pi}{2}\right) & 0 & 0 \\ \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) & \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & c_1 \\ 0 & 0 & 0 & -c_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (156)$$

La ubicación del sistema "e", en la matriz, debe ser la posición (1,1,1), y la ubicación del sistema "0" será determinada con la relación que exista entre una celda y la unidad de desplazamiento implementada. La ilustración 130 permite ver la relación entre las celdas de la matriz, que representa el espacio discretizado, con el desplazamiento en el sistema "e".

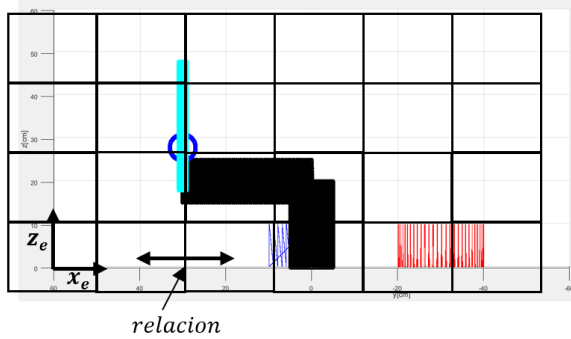


Ilustración 130. Relación entre el sistema "e" y la matriz que representa el espacio discretizado

Para los tres ejes se tiene que:

$$(f - 1).relación = x_e \quad (157)$$

$$(c - 1).relación = y_e \quad (158)$$

$$(h - 1) . relación = z_e \quad (159)$$

Las variables “ f ”, “ c ” y “ h ” son la fila, la columna y la altura en la matriz respectivamente. Para este caso las filas aumentan en dirección del eje x_e , las columnas en dirección al eje y_e y la altura en dirección al eje z_e .

Utilizando la ecuación 155 y 156 es posible trasladar los puntos, que representan obstáculos, al sistema coordenado “e”.

$$p_{obstáculos_e} = H_e^0 \cdot p_{obstáculos_0} \quad (160)$$

Para el caso de los eslabones y el punto terminal del robot se tiene que:

$$p_{1_e} = H_e^0 \cdot puntos_{1_0} \quad (161)$$

$$p_{2_e} = H_e^0 \cdot puntos_{2_0} \quad (162)$$

$$p_{3_e} = H_e^0 \cdot puntos_{3_0} \quad (163)$$

$$p_{4_e} = H_e^0 \cdot puntos_{4_0} \quad (164)$$

$$p_{actuador_e} = H_e^0 \cdot posición_{actuador_0} \quad (165)$$

Luego, mediante las ecuaciones 157 a 159 se puede determinar la posición en la que se ubica cada punto en la matriz, es decir, como ya se poseen todos los puntos trasladados al sistema “e”, se puede utilizar las coordenadas de cada punto para ingresar dichos datos en las ecuaciones 157 a 159, y así hallar el equivalente a la fila, la columna y la altura en la matriz. Las posiciones en la matriz deben ser enteras, por lo que los resultados obtenidos deben ser aproximados a un valor entero, discretizando la posición.

Una vez se tenga las posiciones equivalentes de los obstáculos y del actuador final en la matriz, se procede a marcar las celdas con los valores -1 y -2 respectivamente. En este caso la única celda que puede contener el valor de -2 es aquella que representa la posición del actuador final, mas no

de los eslabones. El valor al que se desee llegar se escoge aleatoriamente marcando cualquier celda con el valor de -3. Para ver el resultado de este paso es necesario mostrar cómo ha quedado la matriz, pero, debido a que se está tratando con una tridimensional, no es posible mostrar los valores que tiene cada celda. Para solucionar esto se utilizan los valores de fila, columna y altura como coordenadas para generar una gráfica que muestre adecuadamente los datos. Los objetos de color negro son los obstáculos, el objeto de color rojo es el punto inicial (posición actual del actuador final) y el de color verde el punto al cual se desea llegar.

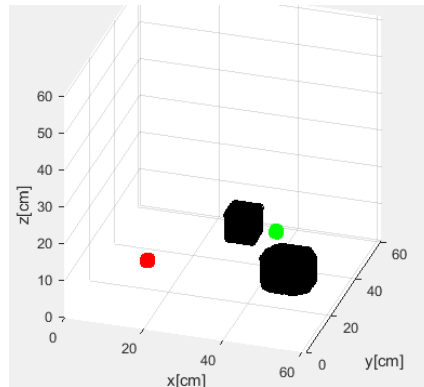


Ilustración 131. Entorno operativo del robot discretizado.

La ilustración 131 es la representación discreta del entorno mostrado en la ilustración 128. En este momento se poseen los mismos datos que se necesitan en el flood fill modificado. Por lo que el paso siguiente es realizar el llenado de la matriz.

Antes de continuar es necesario tener en cuenta que los robots como el Scara tiene la capacidad de llegar a un mismo punto de dos maneras. Esto quiere decir que al momento de realizar el llenado de la matriz no sólo es pertinente tener en cuenta la cantidad de movimientos necesarios para llegar a una celda, sino la forma en la que ha llegado el robot. Se puede diferenciar el tipo de llegada mediante el ángulo que forma el eslabón 3 respecto al 2, ilustración 127. Si el ángulo θ_2 es mayor o igual a 0° y menor o igual a 180° se tomará como la solución de llegada 1 y si es mayor o igual a 180° y menor o igual a 360° se tomará como la solución de llegada 2. En los puntos donde el ángulo es cero o 180 las soluciones son iguales.

5.4 FLOOD FILL MODIFICADO APLICADO AL ROBOT SCARA

Teniendo en mente la existencia de dos soluciones para un mismo punto, se opta por implementar dos matrices. Los valores que toman estas dos matrices, para el estado en el que se encuentra el robot de la ilustración 128, es como se muestra en la ilustración 132 y 133.

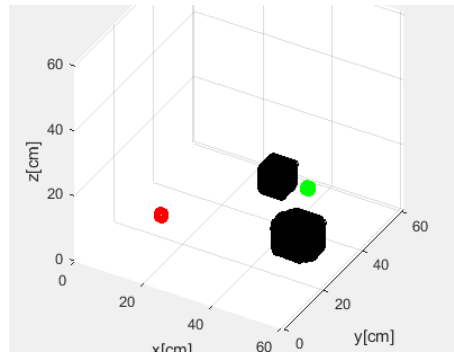


Ilustración 132. Matriz con solución de llegada 1.

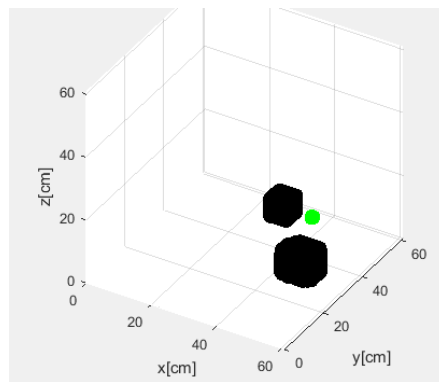


Ilustración 133. Matriz con solución de llegada 2.

Ahora simplemente queda realizar el llenado de las matrices evaluando las colisiones del robot con los obstáculos. Para el caso del algoritmo flood fill modificado, se genera un movimiento en todos los sentidos(x,y,z) y se evalúa si la posición nueva es un obstáculo o si la posición nueva del robot se ubica en un obstáculo. De no existir colisiones, se marca la celda con los pasos que se dieron para llegar a ella. Para el Robot Scara debe hacerse lo mismo, sólo que ahora no se posee una figura cuadrada. Para poder determinar si hay alguna colisión se debe implementar la cinemática inversa del robot Scara, luego las ecuaciones 150 a 153 para hallar la posición respecto al sistema “e” y finalmente las ecuaciones 157 a 159 para determinar las celdas de la matriz en las que se encuentra el robot. Si alguna posición del robot se encuentra en una celda referenciada con el valor -1, significa que dicha posición genera colisión.

Antes de continuar se revisa nuevamente la ilustración 122. Esta representa el estado inicial de la matriz para un espacio de trabajo bidimensional. Si se generan dos iteraciones en el desplazamiento del robot se tiene el siguiente resultado:

0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
-3	-3	-1	-1	-1	0	0
-3	-3	-1	-1	-1	0	0
-3	-3	-1	-1	-1	0	0
-1	-1	-1	-1	-1	0	0
-1	-1	-1	-1	-1	0	0
1	0	-1	0	0	0	0
-2	1	2	0	0	0	0
1	2	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0

Ilustración 134. Segundo movimiento del robot en la situación de la ilustración 122.

Para el Flood Fill modificado se puede condensar los pasos de la siguiente manera:

Paso 1: Inicializar variable entera con un valor igual a 0.

Paso 2: Ubicar las celdas que contengan el valor de la variable. Únicamente para la primera búsqueda se debe hallar la celda con el valor -2. Si no se encuentra alguna celda con el valor buscado, se debe terminar el programa.

Paso 3: Una vez estén ubicadas las celdas, se debe generar un desplazamiento, de una celda, en todos los sentidos(x,y,z) en cada una de ellas. Sólo se debe marcar con el valor (*variable* + 1) las celdas que no experimenten colisión y que contengan un valor igual a cero. Si la nueva posición es la celda con el valor -3 o el perímetro del robot en esa nueva posición entra en contacto con la celda marcada -3, sin generarse colisión, significa que se ha llegado a la solución y que se debe eliminar las iteraciones pasando al paso 5.

Paso 4: Luego de haber evaluado todas las celdas con el valor de la variable. Se incrementa la variable en un valor de 1 (*variable* = *variable* + 1) para que en la siguiente iteración se busque las nuevas celdas. Luego se vuelve al paso 2.

Paso 5: Se debe ubicar en la posición en la que se determinó el fin del algoritmo y almacenar esa posición en una variable que contenga la trayectoria mediante los valores de fila, columna y altura (f,c,h). Luego se debe desplazar a una celda que haya sido marcada con un valor menor al actual (diferente de cero) y almacenar dicha posición en la variable que almacena la trayectoria. Esto se debe repetir hasta alcanzar una celda que contenga el valor de 1.

Para el caso del robot Scara, hay que recordar que se poseen dos matrices y que cada una de ellas representa el movimiento del robot con la “solución de llegada 1” y la “solución de llegada 2”. Se sabe que estas matrices representan el mismo punto únicamente cuando la coordenada generalizada θ_2 es igual a 0 o a 180 grados. La discretización del entorno y del desplazamiento del robot harán que muchas veces sea imposible obtener estos dos valores y que por lo tanto no se pueda relacionar las dos matrices. Para evitar esto, se considera un rango de valores para los cuales la coordenada generalizada hará que un punto sea representado de la misma manera por las dos matrices. Para este caso se considera un rango de 10 grados en sentido positivo y negativo. El algoritmo para el robot Scara queda de la siguiente manera:

Paso 1: Inicializar variable entera con un valor igual a 0.

Paso 2: Ubicar las celdas de la matriz “solución 1” que contengan el valor de la variable. Únicamente para la primera búsqueda se debe hallar la celda con el valor -2. Si no se encuentra alguna celda con el valor buscado, pasar inmediatamente al paso 4.

Paso 3: Una vez ubicadas las celdas, en la matriz “solución 1”, se debe generar un desplazamiento, de una celda, en todos los sentidos (x,y,z) en cada una de ellas. Sólo se debe marcar con el valor (*variable* + 1) las celdas que no experimenten colisión y que contengan un valor igual a cero.

Si la posición se ha marcado, se examina el valor que tiene la coordenada generalizada θ_2 . Si este valor está en el rango implementado para relacionar las matrices, se determina la posición del robot en la matriz “solución 2” en dicha posición. Si no hay colisión, se procede a marcar la misma posición en la matriz “solución 2”.

Si la nueva posición es la celda con el valor -3 y no se generó una colisión, significa que se ha llegado a la solución y que se debe eliminar las iteraciones pasando al paso 7.

Paso 4: Ubicar las celdas de la matriz “solución 2” que contengan el valor de la variable. Únicamente para la primera búsqueda se debe hallar la celda con el valor -2. Si no se encuentra alguna celda con el valor buscado y justo antes en el paso 2 tampoco se encontró una posición, se debe terminar el programa.

Paso 5: Una vez ubicadas las celdas, en la matriz “solución 2”, se debe generar un desplazamiento, de una celda, en todos los sentidos (x,y,z) en cada una de ellas. Sólo se debe marcar con el valor (*variable* + 1) las celdas que no experimenten colisión y que contengan un valor igual a cero.

Si la posición se ha marcado, se examina el valor que tiene la coordenada generalizada θ_2 . Si este valor está en el rango implementado para relacionar las matrices, se determina la posición del robot en la matriz “solución 1” en dicha posición. Si no hay colisión, se procede a marcar la misma posición en la matriz “solución 1”.

Si la nueva posición es la celda con el valor -3 y no se generó una colisión, significa que se ha llegado a la solución y que se debe eliminar las iteraciones pasando al paso 7, de lo contrario se retorna al paso 2.

Paso 6: Luego de haber evaluado todas las celdas con el valor de la variable. Se incrementa la variable en un valor de 1 ($variable = variable + 1$) para que en la siguiente iteración se busque las nuevas celdas. Luego se vuelve al paso 2.

Paso 7: Se debe ubicar en la posición y la matriz en la que se determinó el fin del algoritmo y almacenar esa posición en una variable que almacene la trayectoria mediante los valores de fila, columna, altura y “tipo de solución” (f,c,h,T). Luego se debe desplazar a una celda que haya sido marcada con un valor menor al actuar (diferente de cero) y almacenar dicha posición en la variable que contiene la trayectoria. Esto se debe repetir hasta alcanzar una celda que contenga el valor de 1.

Si en el proceso de desplazamiento no se encuentra una celda que contenga un valor menor al actual (diferente de cero), significa que es momento de empezar a decrementar en la misma posición, pero en la matriz contraria, por lo que la variable “T”, la cual almacena el tipo de solución, debe indicarlo. Esta variable puede tomar valores como “1” o “2”. Indicando con el primer valor que hace referencia a la matriz “solución 1”.

Este es el fin del algoritmo. De los pasos mostrados se presta atención al tres y cinco, debido a que deben examinar si es posible llegar a un punto evaluando si existe colisión entre el robot y un obstáculo. Para poder determinar esto, se debe hacer lo siguiente:

Se desea conocer si es posible marcar la celda (f_n, c_n, h_n) en las dos matrices. El primer paso es trasladar esa ubicación, que es vista desde la matriz, a un punto en el sistema “0”.

Mediante las ecuaciones 157 a 159 se obtiene la posición en el plano “e”:

$$(f_n - 1).relacion = x_{n_e} \quad (166)$$

$$(c_n - 1).relacion = y_{n_e} \quad (167)$$

$$(h_n - 1).relacion = z_{n_e} \quad (168)$$

Mediante la transformada homogénea H_e^0 se traslada el punto al plano “0” de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} x_{n_0} \\ y_{n_0} \\ z_{n_0} \\ 1 \end{bmatrix} = (H_e^0)^T \cdot \begin{bmatrix} x_{n_e} \\ y_{n_e} \\ z_{n_e} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (169)$$

Obtenga una función que determine la cinemática inversa del robot, implementando como argumentos el punto deseado y como valores de retorno las coordenadas generalizadas para las dos soluciones posibles. Se debe indicar al mismo tiempo si hay un error con dicha posición para la solución 1 o la solución 2. Para este paso se deben usar las ecuaciones 131 a 134, debido a que pertenecen al robot Scara(RRP).

La función queda de la siguiente manera:

$$[\theta_1, \theta_2, d, error_1, \theta_{12}, \theta_{22}, error_2] = cin_inv(x_{n_0}, y_{n_0}, z_{n_0}) \quad (49)$$

Si se encuentra en el paso 3, del algoritmo, debe utilizar la solución (θ_1, θ_2, d) . Si no hay error, se procede a usar las ecuaciones 150 a 153 y 161 a 164 para trasladar los puntos al plano “e”, teniendo en cuenta que las matrices homogéneas deben tener dichas coordenadas generalizadas. Luego usando las ecuaciones 157 a 159 se hallan todos los valores (f, c, h) para luego aproximarlos. El resultado obtenido es la posición que está ocupando el robot en la matriz solución 1. Si alguna posición contiene el valor -1 significa que sería un error ubicar el actuador final en esa posición. Por lo que no es posible marcar la celda (f_n, c_n, h_n) de la matriz “solución 1”. Si la función que determina la cinemática inversa detecta un error justo en la posición que se desea evaluar, significa que tampoco es posible marcar dicha posición en la matriz. Los errores pueden contemplar no sólo ubicaciones fuera del alcance del robot, sino ángulos que por restricciones físicas no son posibles de alcanzar.

Para el paso 5 únicamente se debe modificar las coordenadas generalizadas en las matrices homogéneas por las variables $(\theta_{12}, \theta_{22})$ y tener en cuenta que se está tratando con la matriz “solución 2”.

Algunas de las soluciones que se pueden obtener implementando dicho algoritmo se muestran a continuación. Los desplazamientos son graficados con líneas verdes y rojas. Las que son de color verde representan un punto al cual se debe llegar mediante la solución de llegada 1. El asterisco es el punto al cual se desea llegar:

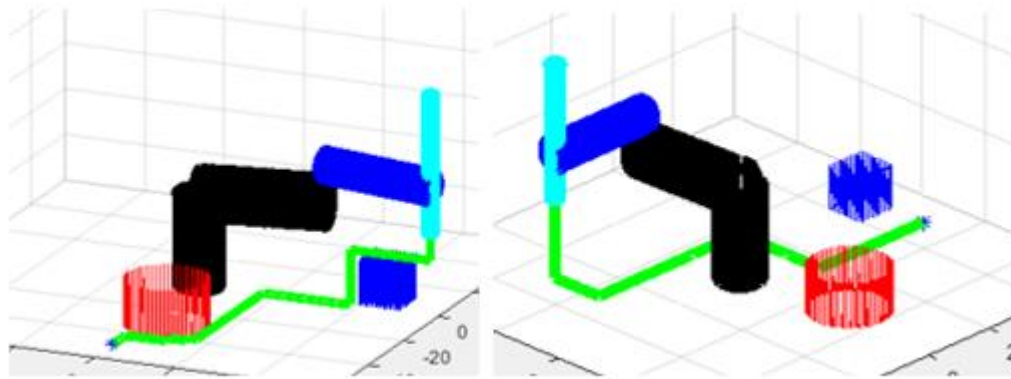


Ilustración 135. Planeación de trayectoria para el robot Scara.

Una situación interesante se da cuando el robot debe cambiar la ubicación del codo para poder llegar a la referencia. A continuación, se simula esta situación modificando la posición del obstáculo azul.

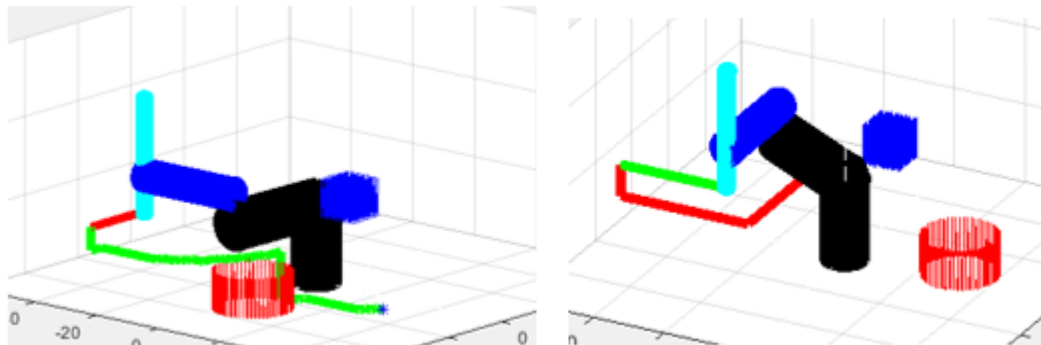


Ilustración 136. Planeación de trayectoria

Implementar el algoritmo Flood Fill modificado en planeaciones de trayectoria de robots Fijos, como el Scara, es una gran herramienta que permite generar soluciones que no sólo evitan obstáculos, sino que determinan la trayectoria más corta. Teniendo en cuenta que los desplazamientos del actuador final se dan mediante traslaciones, que, por movimiento, sólo pueden tener una componente en alguno de los tres ejes coordenados. El tiempo de respuesta y precisión del algoritmo dependen totalmente del tamaño escogido para la matriz que representa, de manera discreta, el entorno operativo del robot. Una mayor precisión involucra necesariamente un aumento en la cantidad de celdas que representan el espacio de trabajo.

Como se ha notado anteriormente, el algoritmo no posee restricción alguna con el tipo de robot implementado. La lógica permite extender la planeación de trayectoria a todo robot con una cinemática inversa analítica.

6. RESULTADOS Y PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

Para iniciar con el análisis de resultados se presenta el gripper que se ha diseñado en la sección mecánica y se corrobora los datos que se calcularon para este. A continuación, se presenta nuevamente el CAD del gripper y luego su construcción física.



Ilustración 137 CAD del gripper



Ilustración 138 Ensamble físico del gripper.

Uno de los parámetros más importantes en este elemento es la fuerza de agarre, la cual es la encargada de generar la fricción necesaria para levantar los objetos. Para conocer dicho valor se hace uso de una gramera con la cual se puede comparar el dato de la ecuación 28. Se tiene especial cuidado con hacer la fuerza en uno de los cuatro sensores que posee este. Los tres sensores sobrantes se aíslan de cualquier fuerza externa para eliminar un posible error en la medición. La ilustración 139 muestra dicha prueba.



Ilustración 139 Medición de la fuerza en las pinzas del gripper mediante una gramera.

Las pruebas fueron hechas con un voltaje de alimentación de 5v, las cuales resultaron en el peso de una masa de 1.35kg. Es decir, una fuerza de 13.27N. la importancia de este diseño radica en que el gripper no es una pieza que únicamente se puede usar en el robot Scara. Los estudiantes

pueden implementarlo para cualquier aplicación de robótica con el robot que estén utilizando. Mediante los agujeros que se han agregado en el diseño, se puede sujetar el gripper en la estructura del robot y así realizar la acción de sujetar. Para saber si el coeficiente de fricción seca es mayor al calculado en la ecuación 30, se levantan, con el gripper, dos de los objetos más pesados que se nombraron en la tabla 1.



Ilustración 140 Gripper sosteniendo celular de 228g

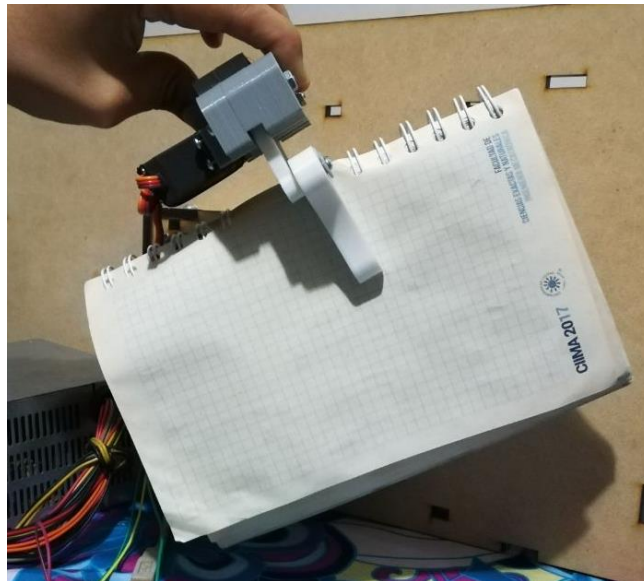


Ilustración 141 Gripper sosteniendo libreta de 248g

Lo anterior argumenta que el coeficiente de fricción seca se encuentra en un valor suficiente como para sostener el peso de estos dos objetos. El diseño del Gripper se puede encontrar en la referencia siguiente para que pueda ser implementado en cualquier trabajo de robótica.

Link: <https://grabcad.com/julian.herrera-4/projects>

El mecanismo en físico que se ha obtenido para el robot Scara se muestra a continuación:



Ilustración 142 Robot Scara en físico.

Para verificar si La estructura es capaz de soportar una carga de un kilogramo, se pesan dos elementos que en conjunto suman una masa de aproximadamente 1kg. Luego se cargan sobre un extremo del eslabón y se observa que efectivamente la estructura por lo menos de manera estática es capaz de soportar dicha carga. La única manera de verificar esto a fatiga es aplicando la carga 12E3 veces. Pero por ahora sólo se verifica de manera estática.



Ilustración 143 Elementos cuya masa en conjunto es de aproximadamente de 1kg.

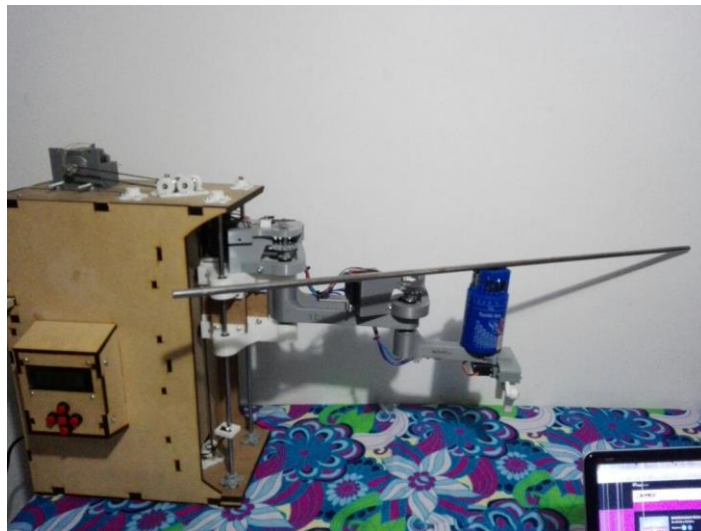


Ilustración 144 Carga de 1kg aplicada en el extremo del eslabón.

La ilustración 143 muestra una varilla y una caja de brocas que son pesadas en la gramera. Luego en la ilustración 144 se carga la estructura y se observa que al menos de manera estática está soportando el peso esperado. Si la estructura sólo se implementa para levantar objetos como los nombrados en la tabla 1. Se puede esperar que el tiempo de vida sea mucho mayor al calculado.

Los circuitos electrónicos diseñados se muestran a continuación:



Ilustración 145 Driver para control de motores paso a paso.

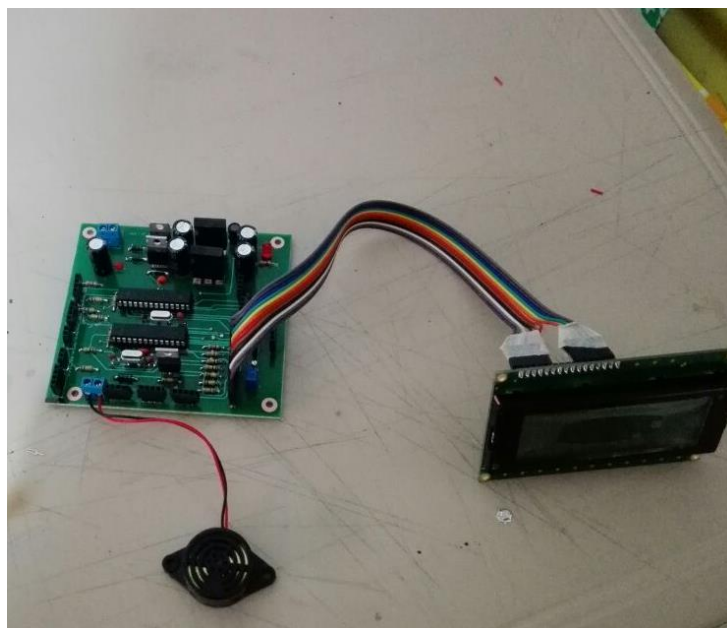


Ilustración 146 Circuito de control.

El correcto funcionamiento de estos elementos se ve reflejado con la satisfactoria conexión con el software diseñado y el movimiento del robot con la cinemática inversa y directa. El robot a continuación se puede ver manipulando algunos objetos impresos.

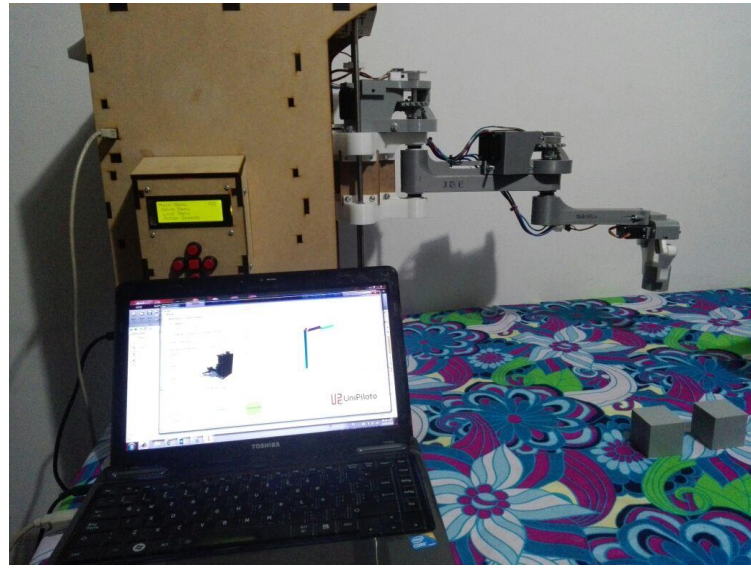


Ilustración 147 manipulación de objeto mediante el software.



Ilustración 148 Manipulación de objeto mediante el software.

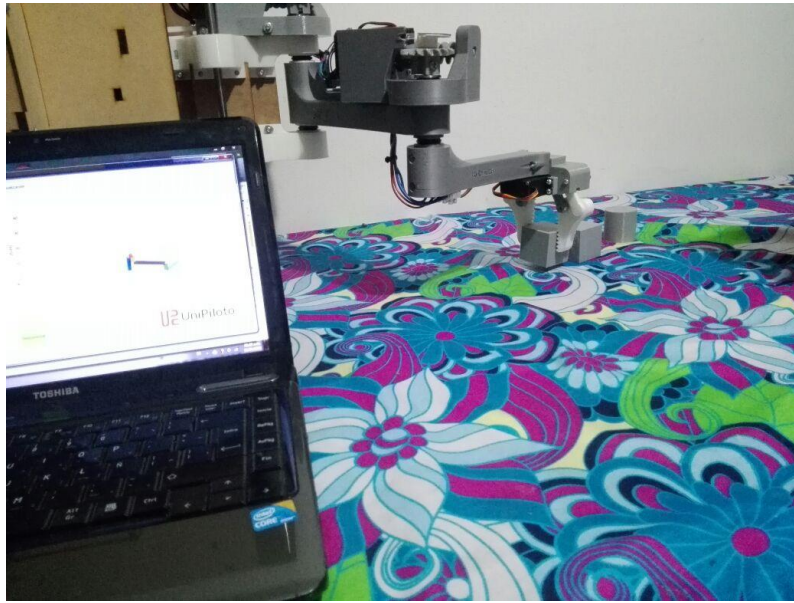


Ilustración 149 Manipulación de objeto mediante el software.

Se ha obtenido un error máximo de posicionamiento angular de 10° . Esto se debe al error que ocurre al abrir los agujeros en los ejes que sostienen los eslabones. Para entender esto se puede dirigir a la ilustración 26. Se puede notar que los tornillos pasan por un agujero a través del eje. Si ese agujero no es exacto, se experimenta un deslizamiento que se ve reflejado en un error en el posicionamiento del robot. Aunque este error sólo ocurre cuando se experimenta una fuerza que impide la rotación de los eslabones.

A continuación, se muestra figuras semi circulares que realizó el robot con un marcador:

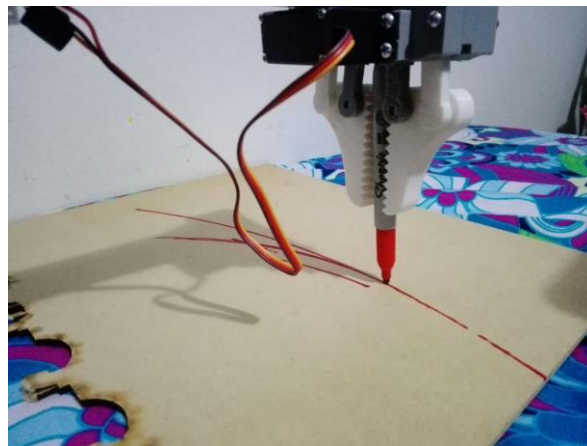


Ilustración 150 Prueba de movimiento del robot con un marcado.

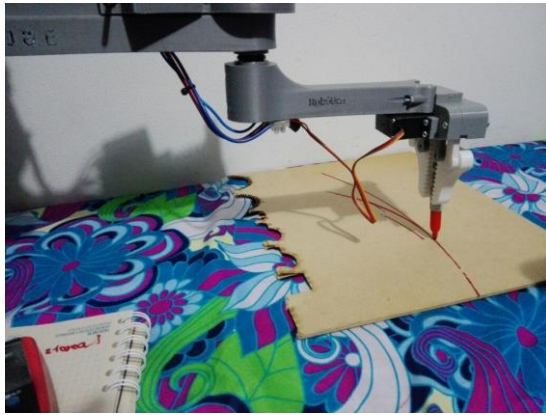


Ilustración 151 Prueba de movimiento con un marcador.

Los resultados indican que no es posible realizar una circunferencia con el robot. El mecanismo, por la fuerza de fricción entre el marcador y la madera, ocasiona que ocurra una desalineación del eslabón y que por lo tanto no pueda ubicarse en la posición que se esperaba. Básicamente los resultados indican que el robot únicamente tiene un desempeño aceptable para la manipulación de objetos. Además de esto los ejes del robot no se encuentran totalmente paralelos, lo que genera que cuando haya una rotación, también se vea afectada la posición en el eje z del gripper. Si se modifica la posición del eje z se daña el grabado a láser y la escritura. Por este motivo se ha descartado la posibilidad de grabar a láser o realizar la acción de escritura.

Los resultados del algoritmo para la planeación de trayectoria de un robot Scara ya se han presentado en el anterior capítulo. Sin embargo, se vuelven a mostrar a continuación:

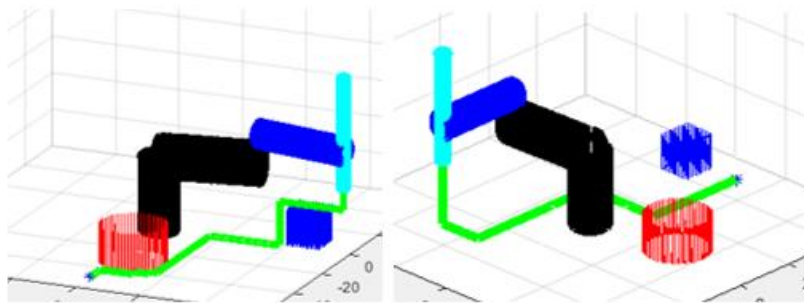


Ilustración 152 planeación de trayectoria para el robot.

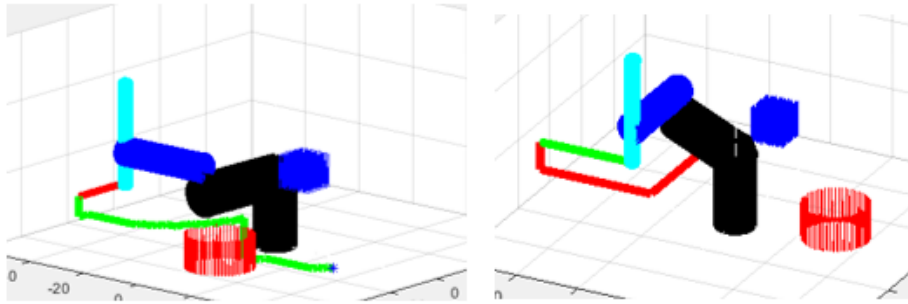


Ilustración 153 Planeación de trayectoria para el robot.

Los resultados que se ven en la ilustración 152 y 153 indican que el algoritmo que se ha explicado tiene la capacidad de mover un robot, con una cinemática inversa analítica, de tal manera que evade obstáculos. Dicho algoritmo tiene en cuenta que el robot tiene la capacidad de llegar a un punto de dos maneras distintas, por lo que en los resultados se ha graficado la trayectoria con una línea verde y roja. En donde cada una de ellas indica de qué forma debe trasladarse el robot para evitar chocarse. La figura 153 muestra que el robot debe cambiar la posición del codo para evitar una colisión con el objeto cuadrado de color azul, el color azul indica un tipo de llegada mientras que el rojo otra.

7. CONCLUSIONES

El robot Scara diseñado es una buena herramienta trabajo siempre y cuando esta sea utilizada para la manipulación de objetos, ya que, por defectos mecánicos, se ha imposibilitado la acción de escritura y grabado a láser. Estos defectos se encuentran relacionados con los errores en el modelado por deposición fundida y la poca exactitud en la creación de agujeros en los ejes del robot. Por lo que se concluye que se debe modificar cualquier engranaje sin fin por uno recto, helicoidal o planetario. Ya que estos son impresos con un error mucho menor. Se debe modificar la conexión actual de los ejes a los eslabones por un mecanismo similar al de los acoples, de esta manera se elimina el deslizamiento que causa error.

El diseño del gripper no posee ningún defecto mecánico, por lo que realiza su función de manera correcta. Este puede ser usado en otros mecanismos y por lo tanto ayuda a la creación de cualquier proyecto en robótica. Sin embargo, se ha evidenciado que para el robot Scara implementado es deseable tener un gripper que tenga dos grados de libertad. Debido a que, para la sujeción de algunos objetos, es necesario modificar la orientación del gripper.

El driver y circuito de control diseñados son herramientas que pueden ser implementadas para un proyecto diferente a este. Se ha obtenido un buen resultado con el circuito de control. Sin embargo, el driver debe ser creado con cuidado, ya que los transistores genéricos pueden causar estragos. Se ha experimentado la falla de algunos transistores que no soportaban la mitad del valor que poseen en su datasheet. Por lo que, si no se poseen transistores originales, es preferible adquirir un driver comercial.

El software que controla el robot Scara no sólo tiene esta función. Este puede ser implementado para simular las matrices homogéneas y la cinemática directa e inversa de los cuatro robots más comunes en la robótica, por lo que puede ser usado para una enseñanza gráfica. Además de esto permite la comunicación con cualquier placa, por lo que puede ser implementado para controlar otro robot diferente al Scara.

El algoritmo de planeación de trayectoria es una buena herramienta que permite evitar la colisión del robot con cualquier obstáculo que se encuentra en el entorno operativo del mismo. Aunque este algoritmo iterativo puede requerir grandes niveles de procesamiento, se puede compensar disminuyendo el tamaño de la matriz que representa el entorno del robot. De esta manera se pueden obtener tiempos de respuesta más rápidos, pero con precisiones menores.

8. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Se recomienda mantener calibrada la impresora con la que se generan las piezas del gripper o de la estructura del robot SCARA, ya que esto provoca que el funcionamiento se vea gravemente afectado, sobre todo en mecanismo de transmisión de potencia, como los engranajes. Además de esto se advierte que es necesario probar cada transistor mosfet antes de su implementación en los drives, ya que, por lo general, estos poseen valores muy por debajo de los que se referencia en los datasheet. También es necesario verificar los efectos del ruido sobre el circuito, ya que en algunos casos el driver puede generar cortos si las señales de activación no son claras.

Como trabajo a futuro se desea diseñar las piezas de tal manera que se unan a los ejes de la misma forma cómo funcionan los acoples. Además de esto, es necesario evitar implementar engranajes sin fin ya que la impresora posee bastante error al generarlos. Por lo que se desea crear engranajes planetarios que permitan obtener una razón de engranaje alta en un espacio reducido. Además de esto también se debe agregar un grado de libertad al gripper, con el fin de orientarlo y sujetar mejor algunas piezas.

9. REFERENCIAS

1. **Barrientos, Antonio.** *Fundamentos de Robótica*. España : Mc-GrawHill, 1997. 978844815636-7.
2. **Pérez Cisneros, Marco A, Cuevas Jimenéz, Erik V y Zaldívar Navarro, Daniel.** *Fundamentos de robótica y mecatrónica con Matlab y Simulink*. México : Alfaomega, 2014. 978-607-622-169-3.
3. **Mecademic.** Mecademic - Industrial robotics in the palm of your hand. [En línea] Mecademic. [Citado el: 30 de 11 de 2017.] <https://www.mecademic.com/products/Meca500-small-robot-arm>.
4. *Diseño e implementacion de un brazo robotico educacional con aplicaciones culinarias.* **López, Juan, y otros.** 45-53, Villa del Rosario : Vector, 2012, Vol. VI. 1909-7891.
5. *Algoritmos para la planificación y seguimiento de trayectorias en robots agricolas.* **Correa, Christian y Vásquez, Lorenzo.** Londrina : Conbea 2012, 2012.
6. *Manfred: Robot antropomórfico de servicio fiable y seguro para operar en entornos humanos.* **Blanco, Dolores, y otros.** 3, Madrid : Revista Iberoamericana de Mecánica, 2005, Vol. IX.
7. *Diseño de un manipulador robótico con tres grados de libertad para fines educativos.* **Andueza, Luís y Aguirre, Iñaki.** 1, Mérida : Revista de Ciencia e Ingeniería, 2009, Vol. 30. 1316-7081.
8. **Jiménez Robayo, César Eduardo.** *Diseño y construcción de un robot tipo scara con sistema de vision de maquina que pueda ser utilizado como herramienta didáctica en asignaturas de robótica y control*. Bogotá : Proyecto de Grado, 2009.
9. *Quantitative Comparsion of Flood Fill and Modified Flood Fill Algorithms.* **George, L.** 3, International Journal of Computer Theory and Engineering : 503-508, 2013, Vol. 5.
10. **Cortés, Fernando Reyes.** *MATLAB aplicado a robótica y mecatrónica*. méxico : Alfaomega, 2012.
11. **Torres, Edgar, León, Jersson, Edwin.** *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA IMPRESORA 3D APLICANDO LA TÉCNICA DE PROTOTIPADO RÁPIDO*. BUENOS AIRES : CAIM, 2012.
12. **Norton, Robert L.** *Diseño de Máquinas*. México : Pearson, 2011. 978-607-32-0589-4.
13. **esun colombia.** [En línea] [Citado el: 1 de 1 de 2018.] <http://esuncolombia.com/materiales-esun>.
14. **Pastor, Antonio Alberto Relaño.** *Estudio comparativo de piezas de ABS y PLA procesadas mediante modelado por deposición fundida*. Madrid : Universidad Carlos III de Madrid, 2013.
15. *Optimización y caracterización de piezas de PLA fabricadas mediante técnicas aditivas.* Madrid : Universidad Carlos III de Madrid, 2014.
16. **Averett, RD, Realff, ML, Jacob, K.** The mechanical behavior of poly(lactic acid) unreinforced and nanocomposite films subjected to monotonic and fatigue loading conditions. *Journal of Composite Materials*. 2011, Vol. 45, 2717–2726.
17. **Ferdinand P. Beer, E. Russell Johnston, David F. Mazurek.** *MECÁNICA VECTORIAL para INGENIEROS*. méxico : Mc Graw Hill, 2013.

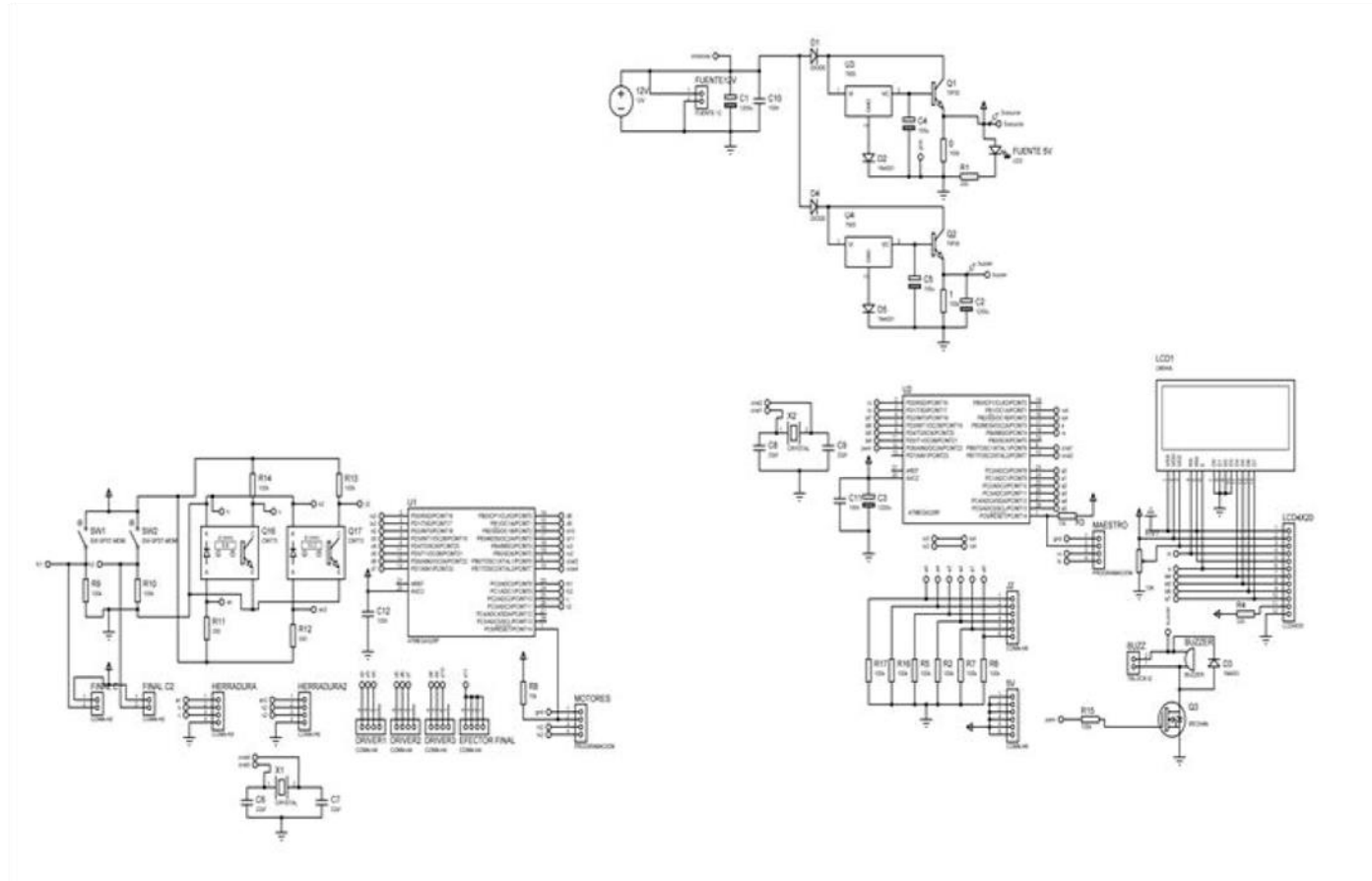
18. AGMA. AGMA. [En línea] [Citado el: 3 de 1 de 2018.] <https://www.agma.org/>.
19. URB. *general rolling bearings*. 2014.
20. MITSUBOSHI. *Design Manual Timing Belt*.
21. Hart, Daniel W. *Electrónica de potencia*. Madrid : Pearson, 2001. 84-205-3179-0.
22. Boylestad, Robert L y Nashelsky, Louis. *Electrónica: Teoría de circuitos y dispositivos electrónicos*. México : Pearson, 2009. 978-607-442-292-4.
23. Z, Marco A. Erik V. Daniel. *Fundamentos de robótica y mecatrónica con MATLAB y Simulink*. México : Alfaomega, 2014.
24. Ogata, Katsuhiko. *Ingeniería de control moderna*. Madrid : PEARSON, 2010.
25. ARDUINO. [En línea] [Citado el: 6 de 1 de 2018.] <https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3>.
26. *Autonomous Navigation of Mobile Robot Based on Flood Fill Algorithm*. Jabbar, Ayad Mohammed. 1, Basra : Iraq J. Electrical and Electronic Engineering , 2016, Vol. 12.
27. IEEE CPP. CPP IEEE. [En línea] The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2016. [Citado el: 30 de Julio de 2017.] <http://www.cppieee.org/micromouse>.
28. Richard G. Budynas, J. Keith Nisbett. *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. México : McGraw-Hill, 2008.

ANEXO 1.

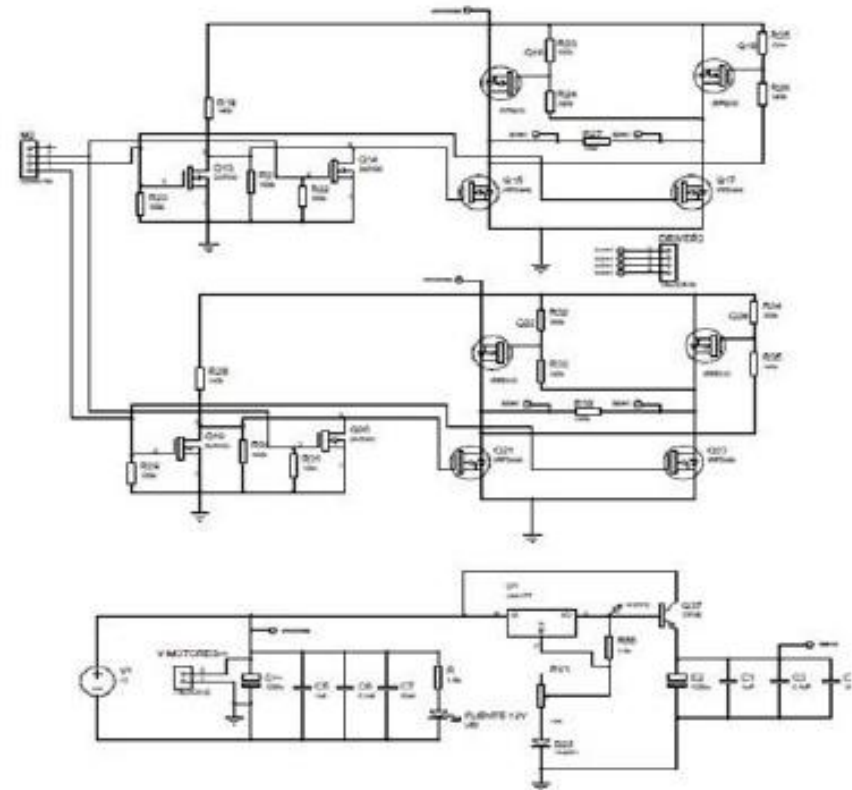
PLANOS ELÉCTRICOS

PROYECTO PG 17-1-04
ANÁLISIS Y DISEÑO DE ROBOT
MULTIFUNCIONAL SCARA CON ENFOQUE
PEDAGÓGICO EN ROBÓTICA

ANEXO 1. PLANOS ELÉCTRICOS



Diseñado por Julian Herrera Benavides	Revisado por Daniel Espitia Corredor	Director: David Herrera Alfonso	Fecha 10/01/2018	Plano N° 1
Departamento: Facultad de ingeniería mecatrónica		Proyecto: Robot Scara multifuncional		Escala --
Nombre de la pieza: Circuito de control			Material: --	Unidades: --

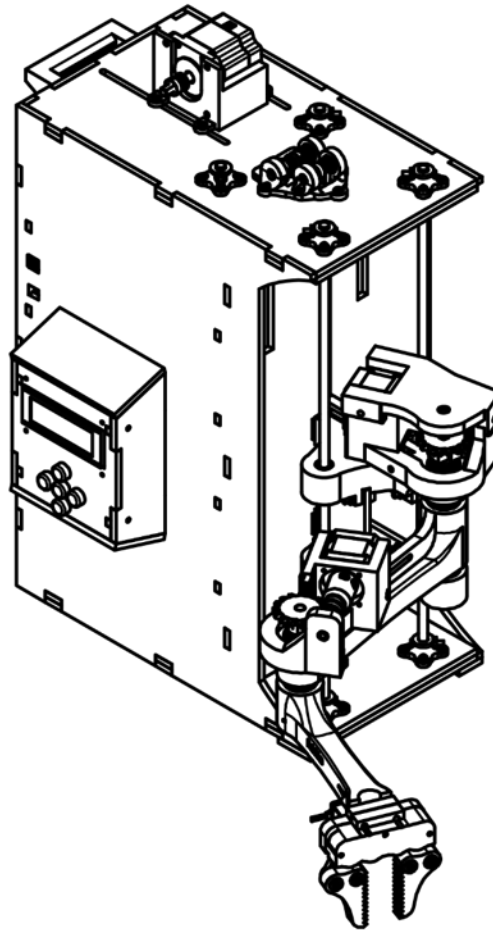


ANEXO 2.

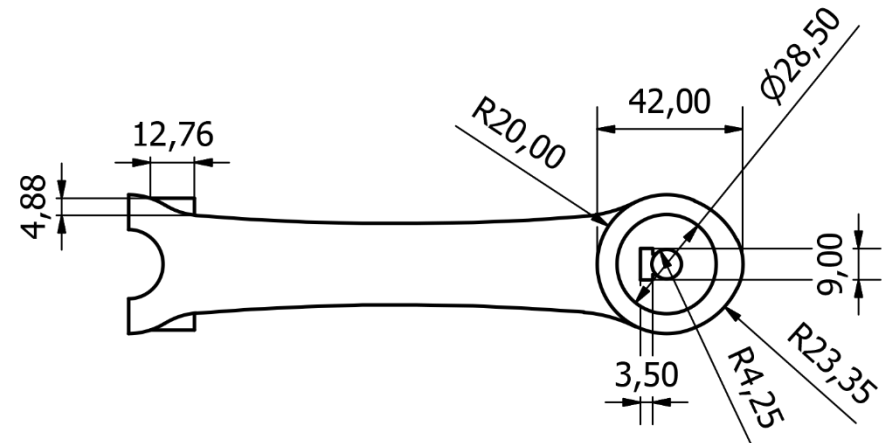
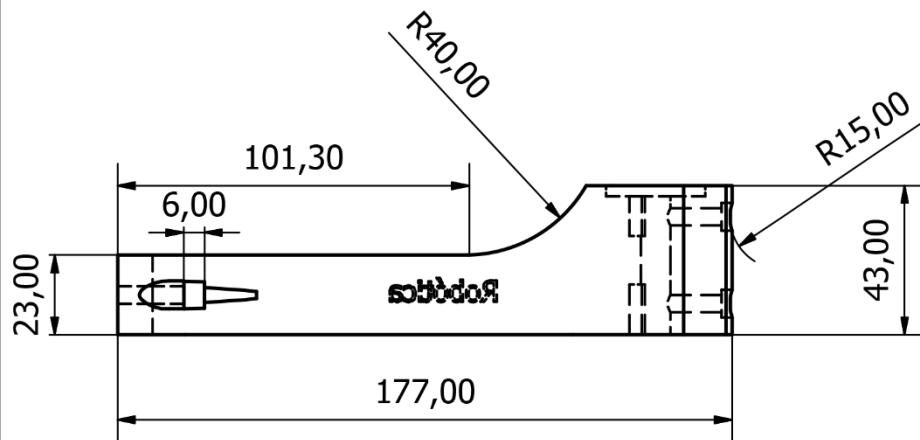
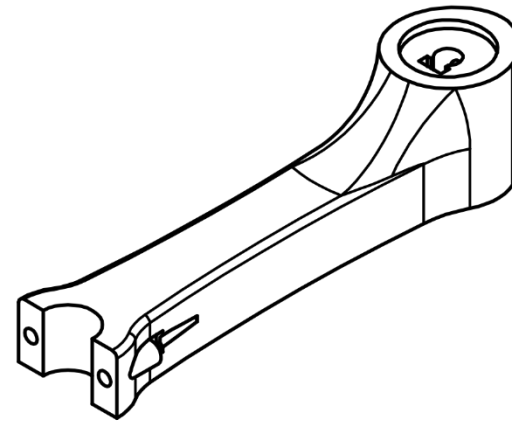
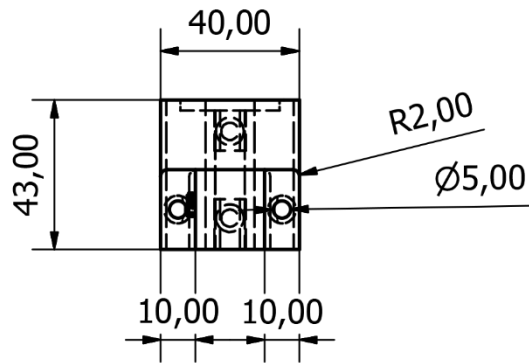
PLANOS MECÁNICOS

PROYECTO PG 17-1-04
ANÁLISIS Y DISEÑO DE ROBOT
MULTIFUNCIONAL SCARA CON ENFOQUE
PEDAGÓGICO EN ROBÓTICA

ANEXO 2. PLANOS MECÁNICOS

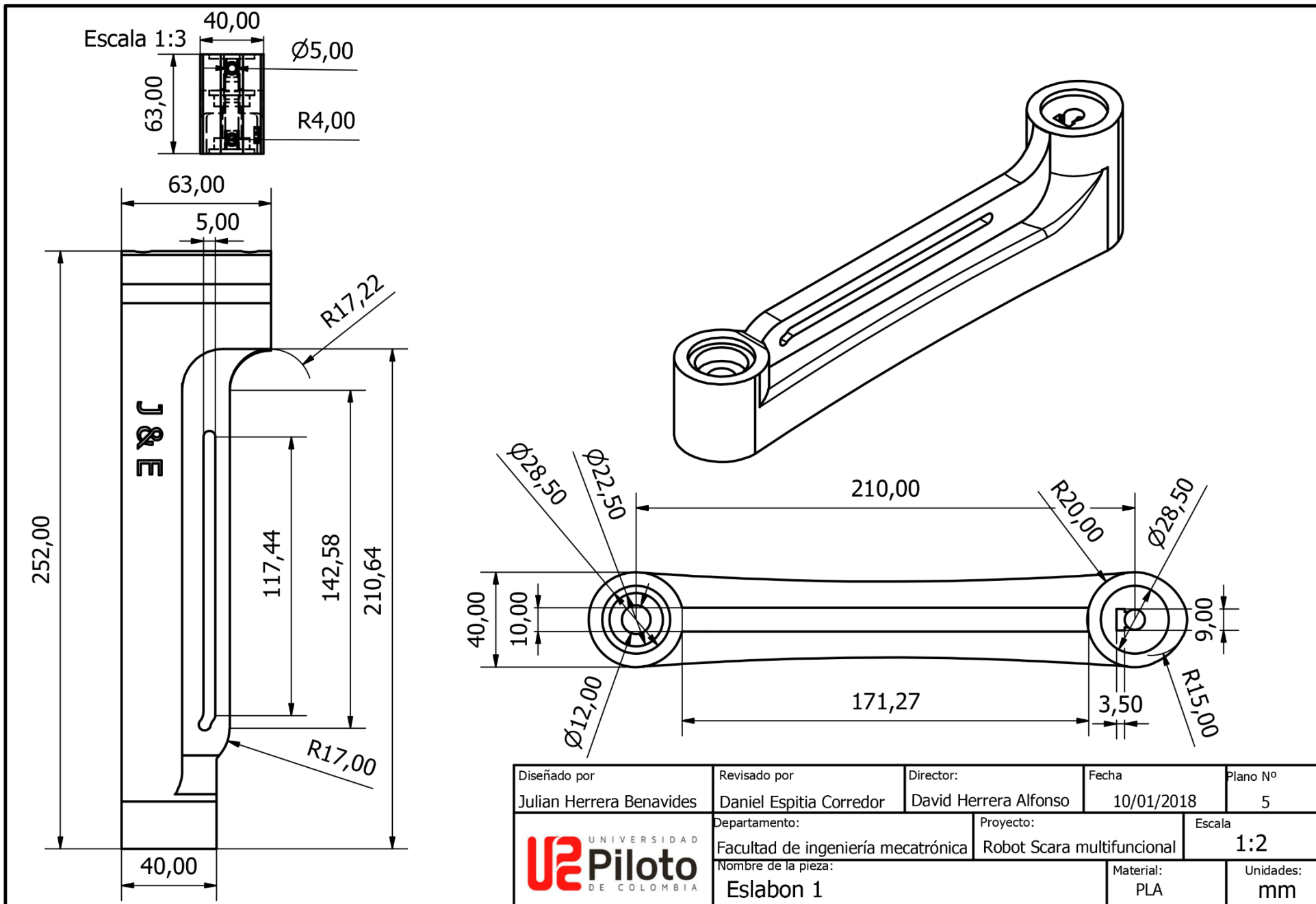


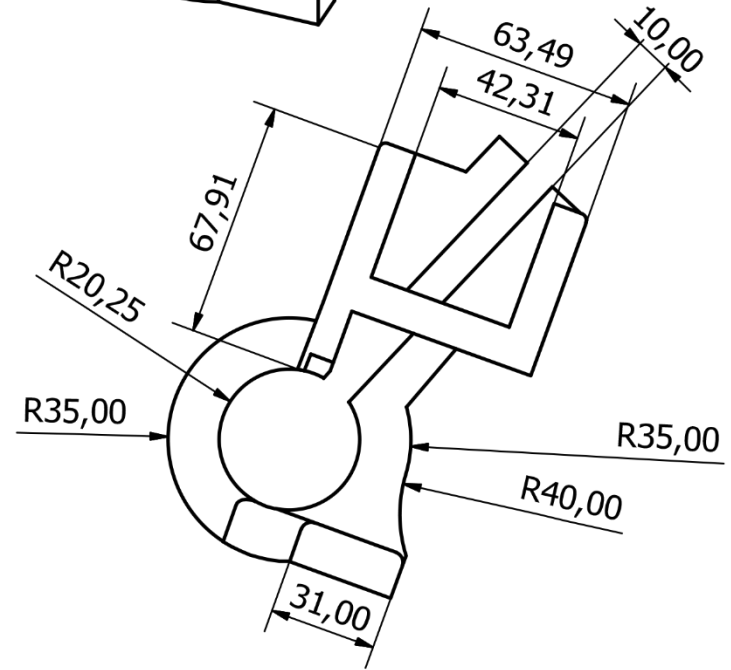
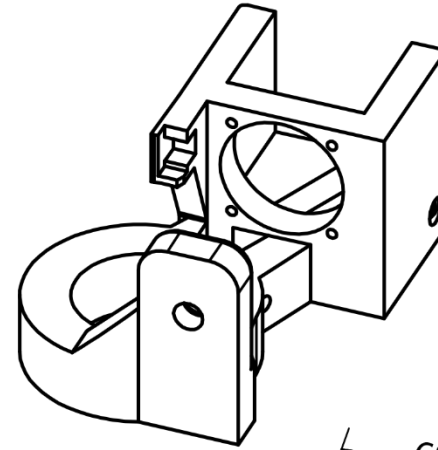
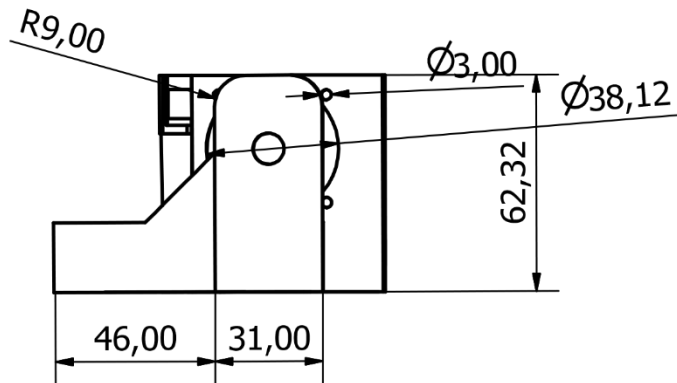
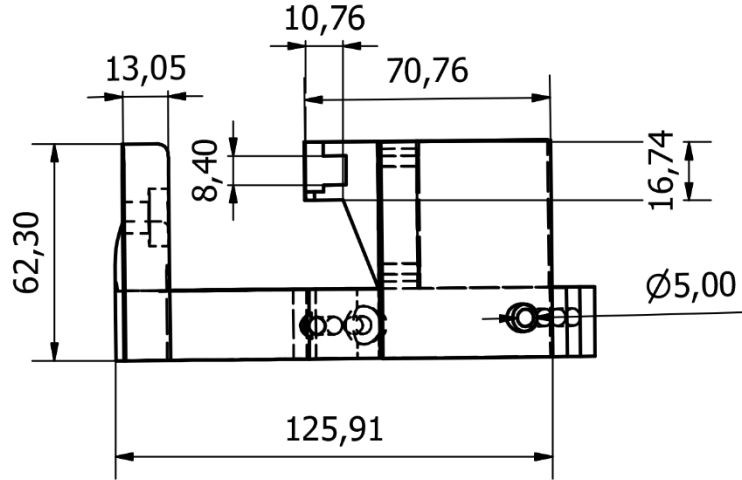
Diseñado por Julian Herrera Benavides	Revisado por Daniel Espitia Corredor	Director: David Herrera Alfonso	Fecha 10/01/2018	Plano N° 3
Departamento: Facultad de ingeniería mecatrónica		Proyecto: Robot Scara multifuncional		Escala --
Nombre de la pieza: Robot Scara			Material: --	Unidades: --



Diseñado por Julian Herrera Benavides	Revisado por Daniel Espitia Corredor	Director: David Herrera Alfonso	Fecha 10/01/2018	Plano N° 4
Departamento: Facultad de ingeniería mecatrónica		Proyecto: Robot Scara multifuncional		Escala 1:2
Nombre de la pieza: Eslabon final			Material: PLA	Unidades: mm

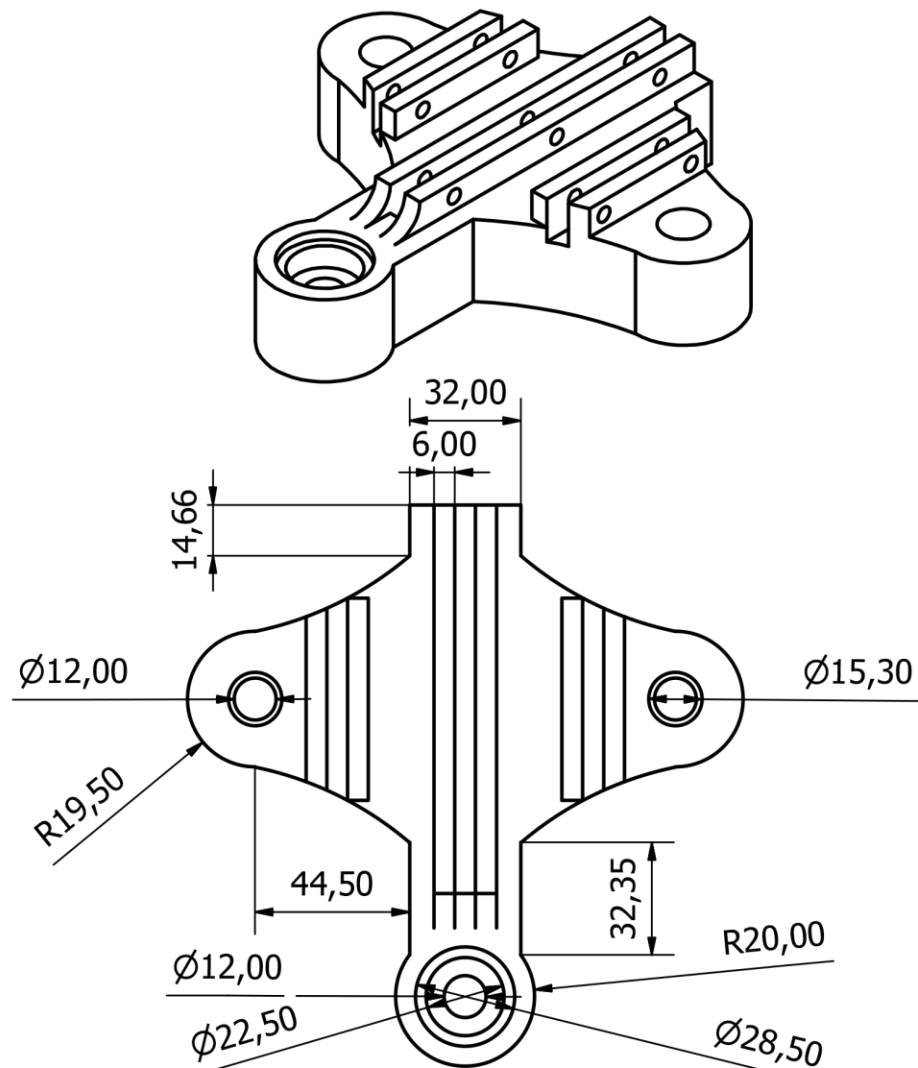
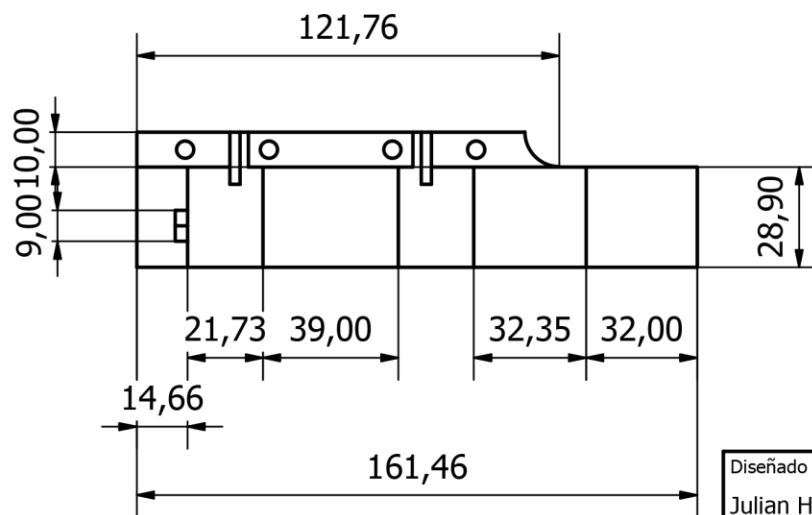
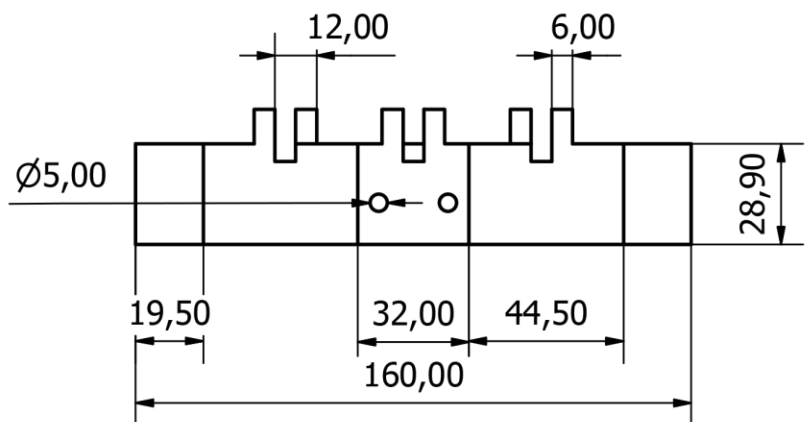






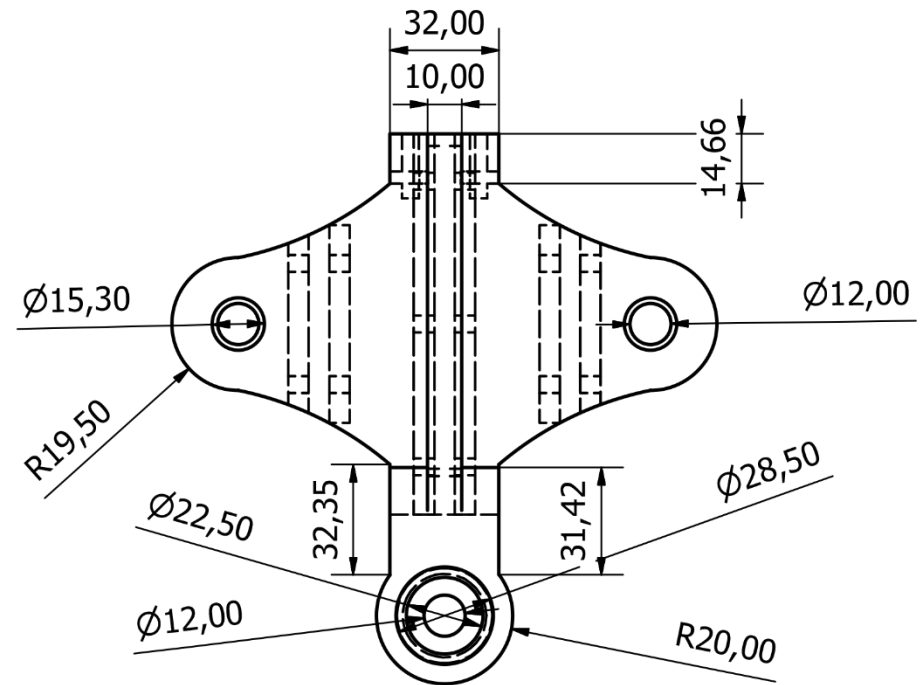
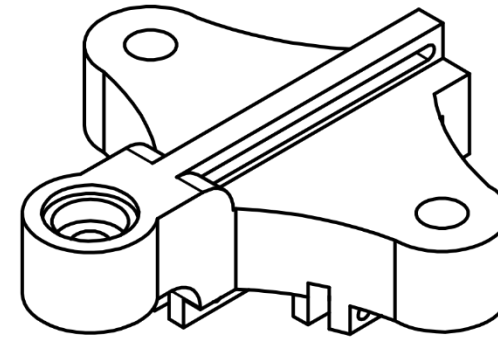
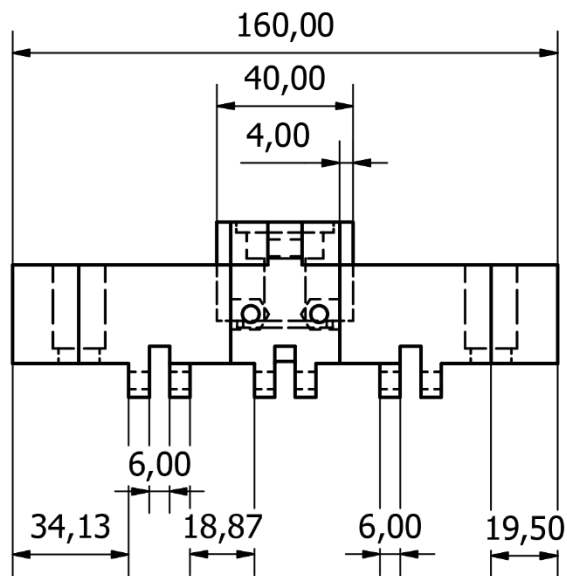
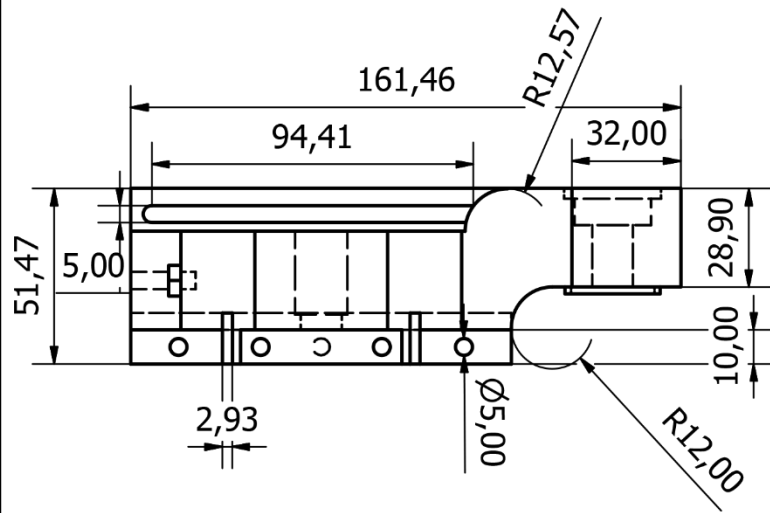
Diseñado por Julian Herrera Benavides	Revisado por Daniel Espitia Corredor	Director: David Herrera Alfonso	Fecha 10/01/2018	Plano N° 6
Departamento: Facultad de ingeniería mecatrónica		Proyecto: Robot Scara multifuncional		Escala 1:2
Nombre de la pieza: Soporte de motor eslabon final			Material: PLA	Unidades: mm





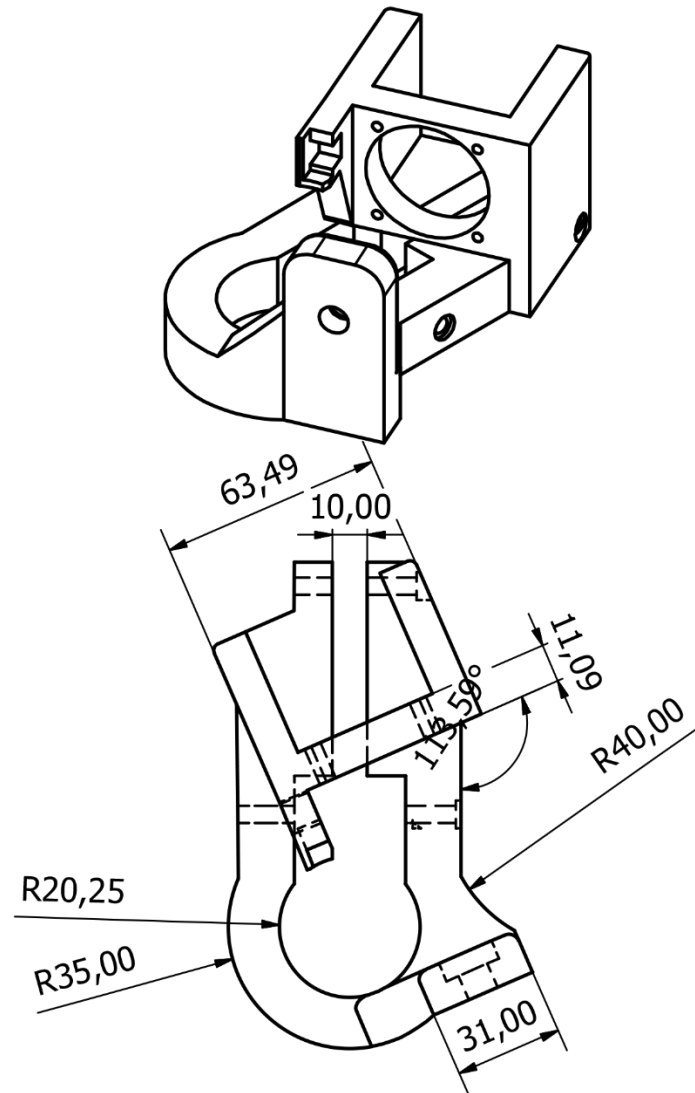
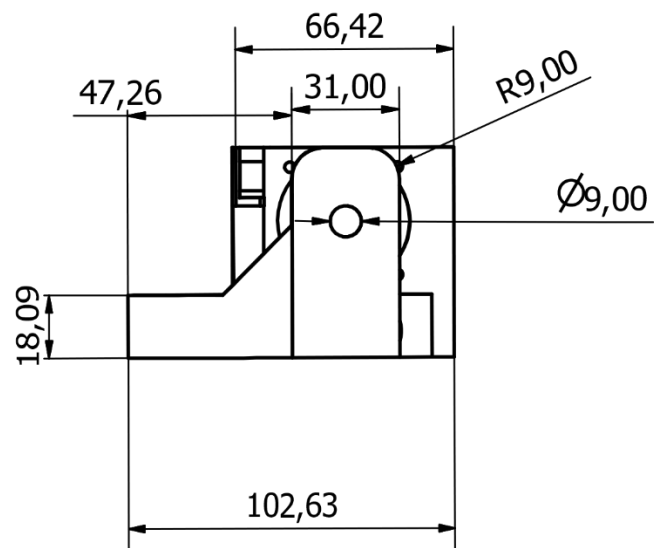
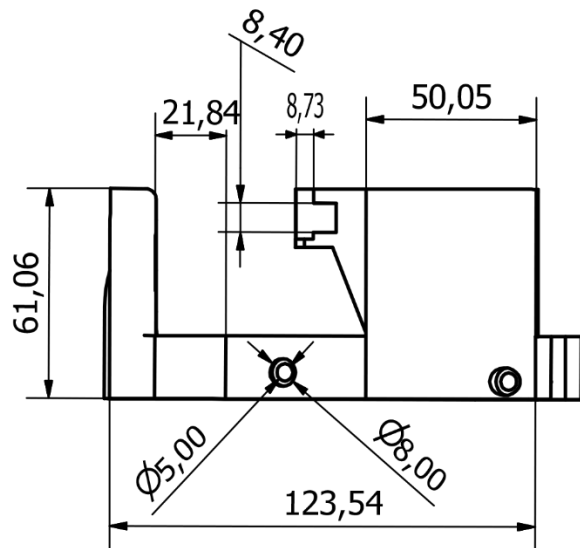
Diseñado por	Revisado por	Director:	Fecha	Plano N°
Julian Herrera Benavides	Daniel Espitia Corredor	David Herrera Alfonso	10/01/2018	7
Departamento:		Proyecto:		Escala
Facultad de ingeniería mecatrónica		Robot Scara multifuncional		1:2
Nombre de la pieza:			Material:	Unidades:
Soporte inferior del eje Z			PLA	mm





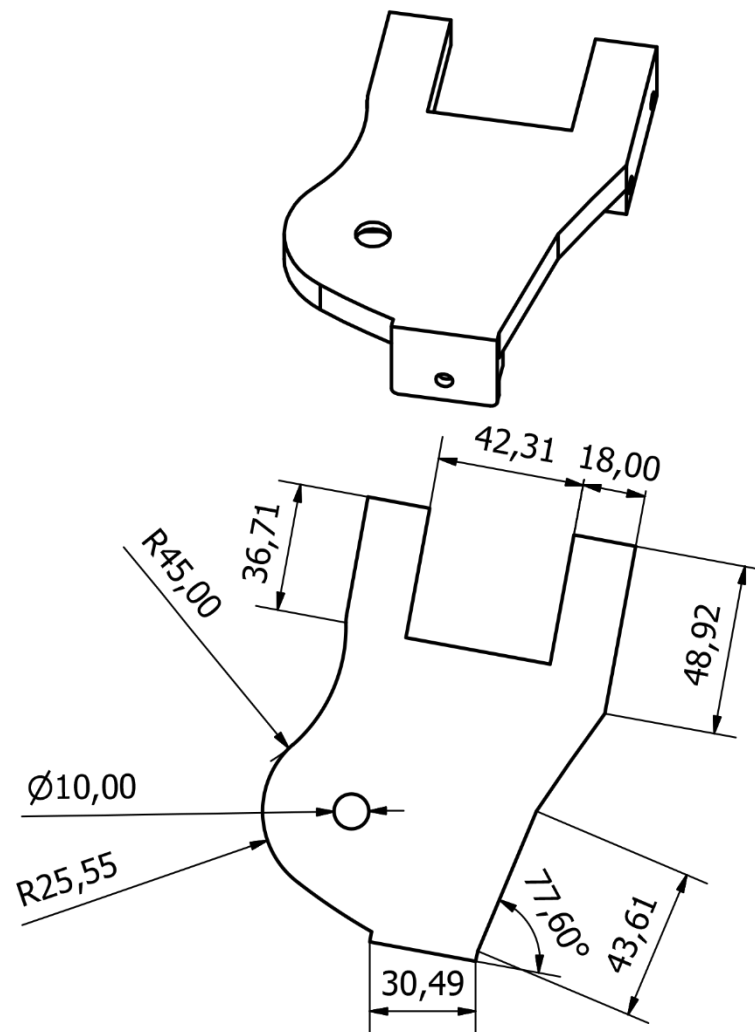
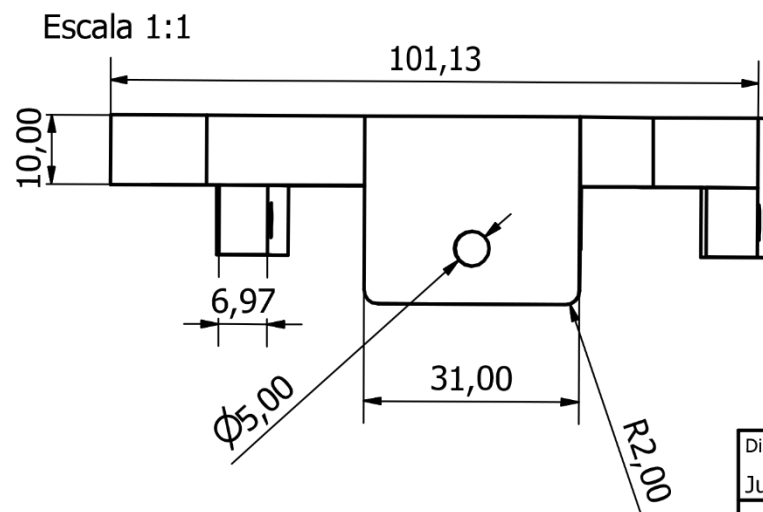
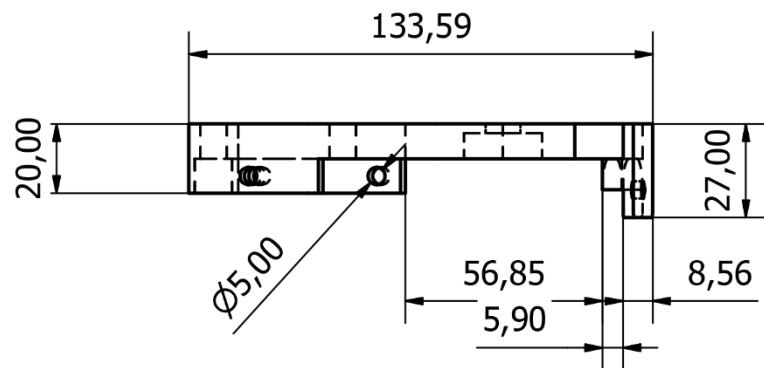
Diseñado por Julian Herrera Benavides	Revisado por Daniel Espitia Corredor	Director: David Herrera Alfonso	Fecha 10/01/2018	Plano N° 8
Departamento: Facultad de ingeniería mecatrónica		Proyecto: Robot Scara multifuncional		Escala 1:2
Nombre de la pieza: Soporte superior del eje Z			Material: PLA	Unidades: mm





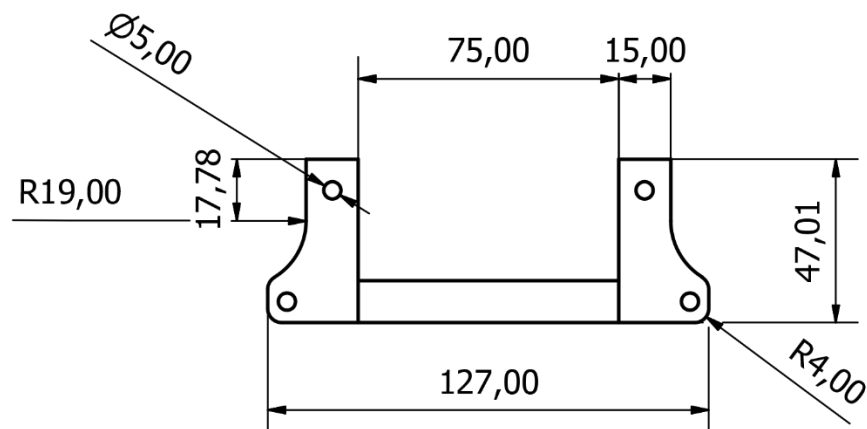
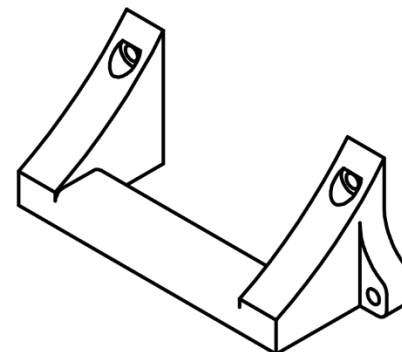
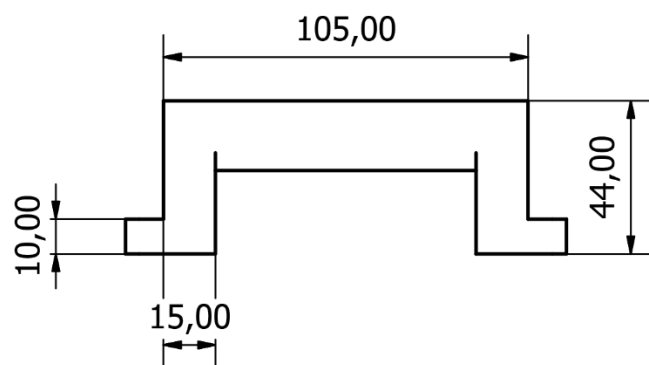
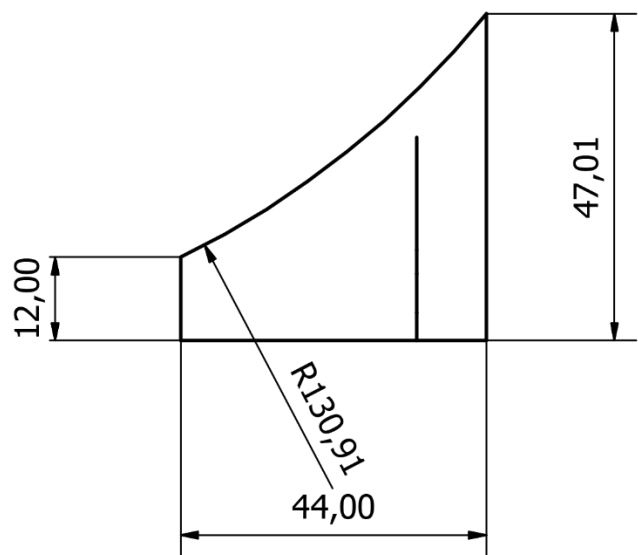
Diseñado por Julian Herrera Benavides	Revisado por Daniel Espitia Corredor	Director: David Herrera Alfonso	Fecha 10/01/2018	Plano N° 9
Departamento: Facultad de ingeniería mecatrónica		Proyecto: Robot Scara multifuncional		Escala 1:2
Nombre de la pieza: Soporte de motor eslabon 1			Material: PLA	Unidades: mm





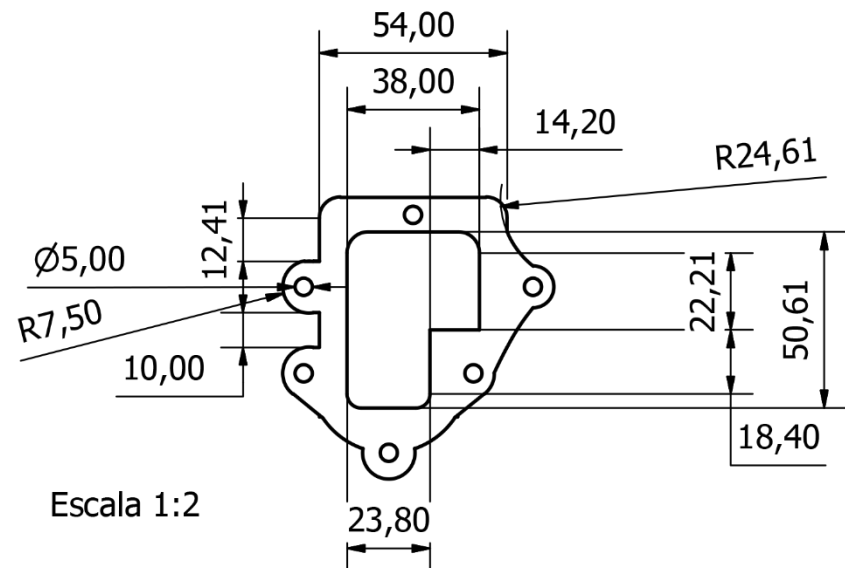
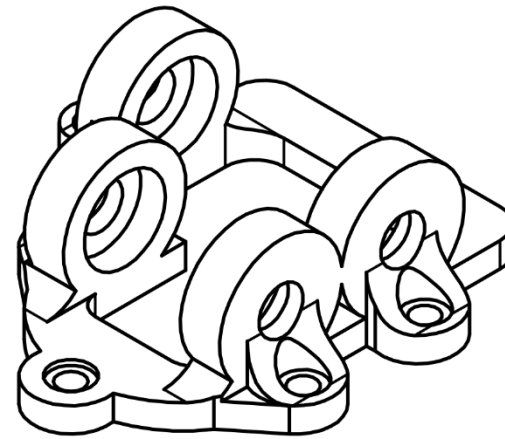
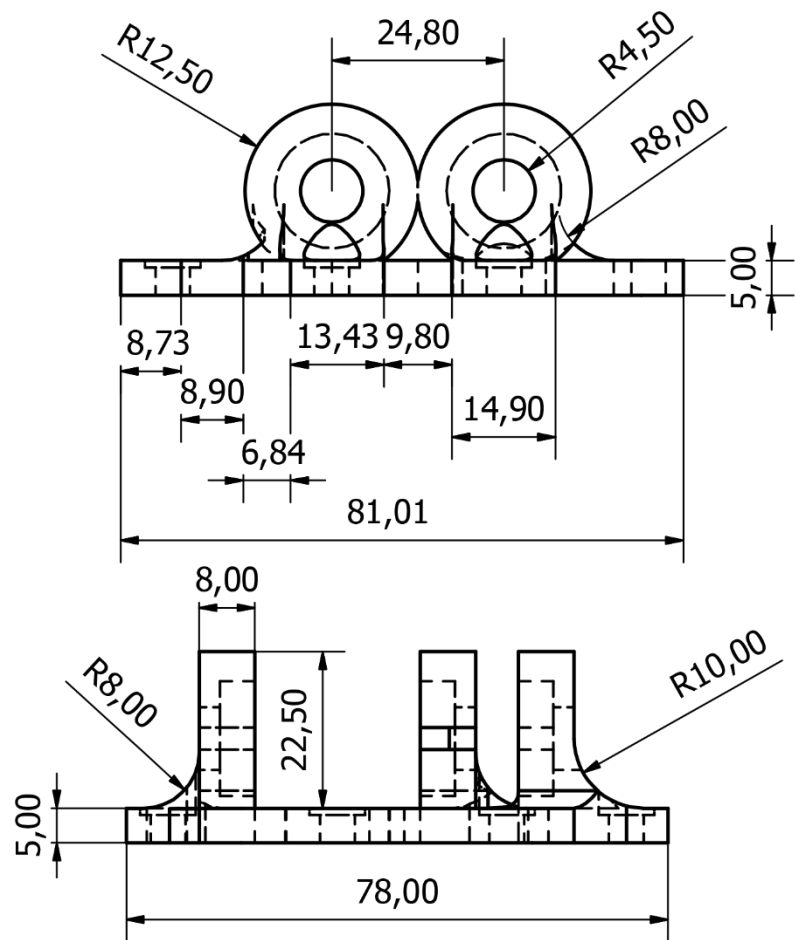
Diseñado por	Revisado por	Director:	Fecha	Plano N°
Julian Herrera Benavides	Daniel Espitia Corredor	David Herrera Alfonso	10/01/2018	10
Departamento:		Proyecto:		Escala
Facultad de ingeniería mecatrónica		Robot Scara multifuncional		1:2
Nombre de la pieza:			Material:	Unidades:
Cubierta del motor			PLA	mm





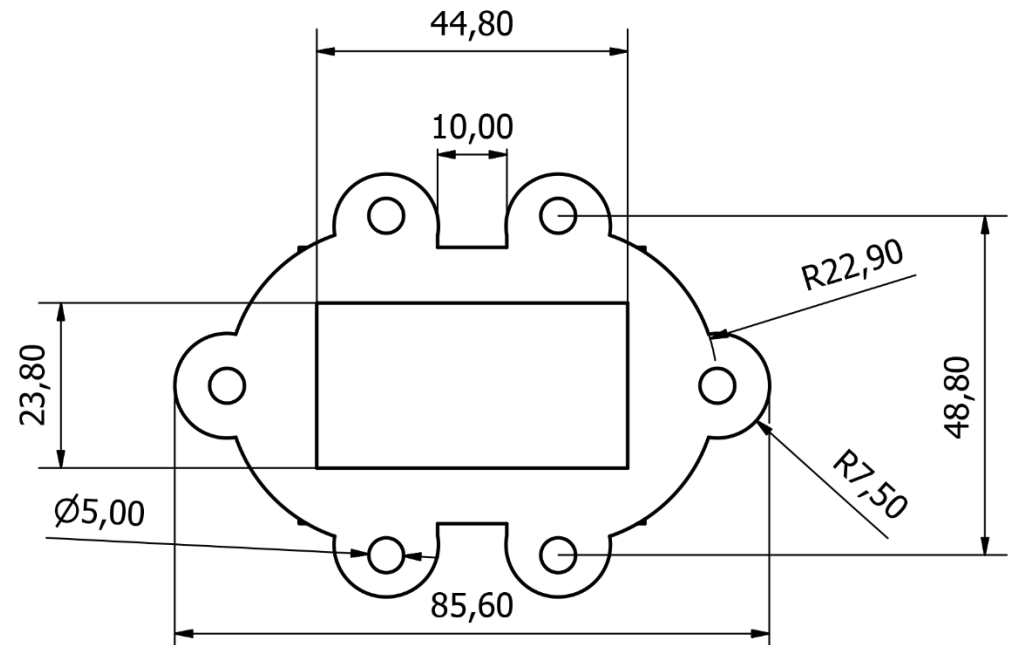
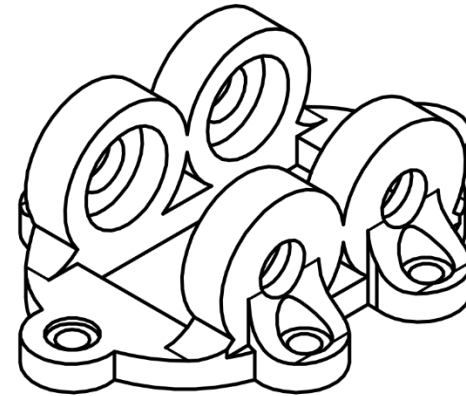
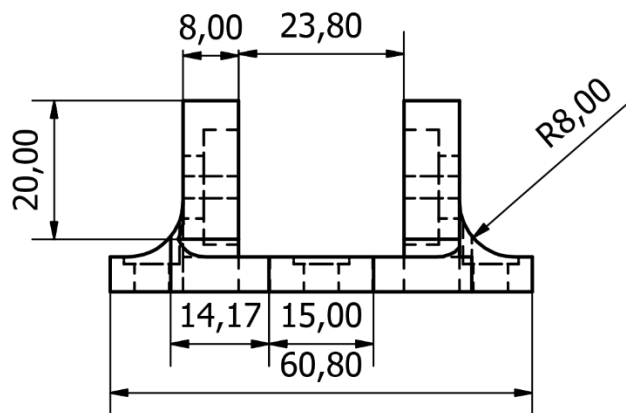
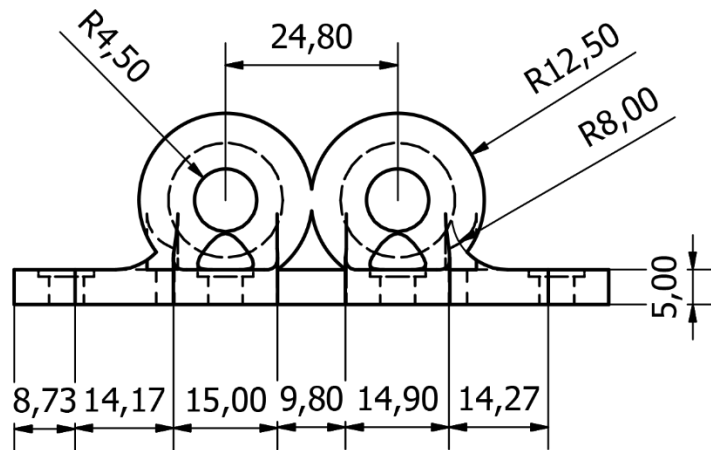
Diseñado por Julian Herrera Benavides	Revisado por Daniel Espitia Corredor	Director: David Herrera Alfonso	Fecha 10/01/2018	Plano N° 11
Departamento: Facultad de ingeniería mecatrónica		Proyecto: Robot Scara multifuncional		Escala 1:2
Nombre de la pieza: Sujetador			Material: PLA	Unidades: mm





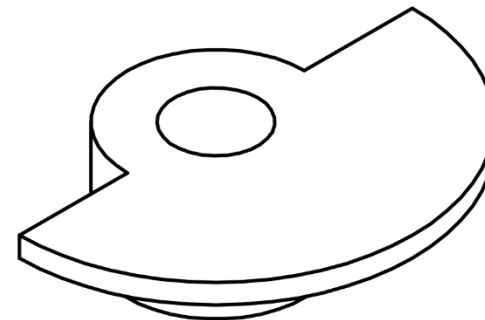
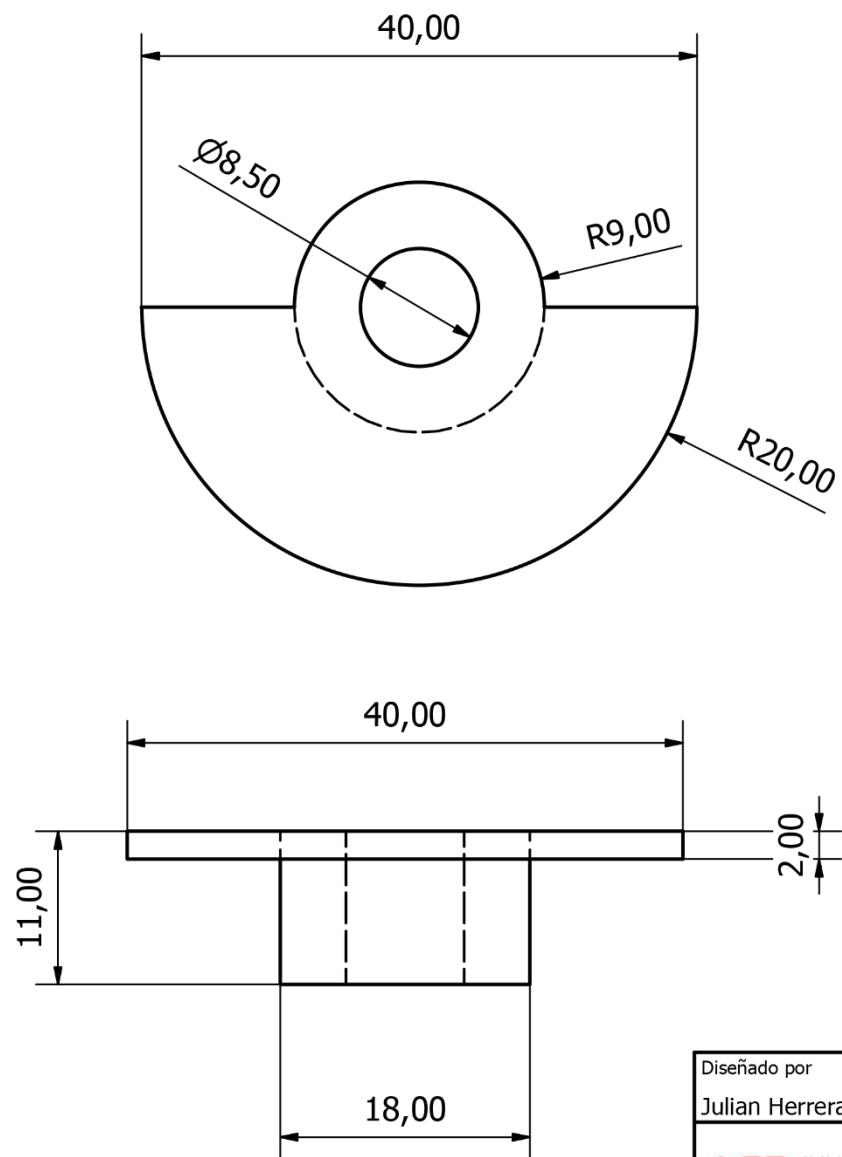
Escala 1:2

Diseñado por Julian Herrera Benavides	Revisado por Daniel Espitia Corredor	Director: David Herrera Alfonso	Fecha 10/01/2018	Plano N° 12
Departamento: Facultad de ingeniería mecatrónica		Proyecto: Robot Scara multifuncional		Escala 1:1
Nombre de la pieza: Soporte de rodamientos radiales 1			Material: PLA	Unidades: mm

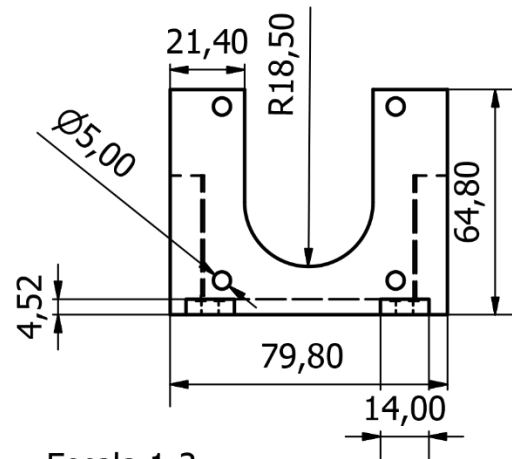
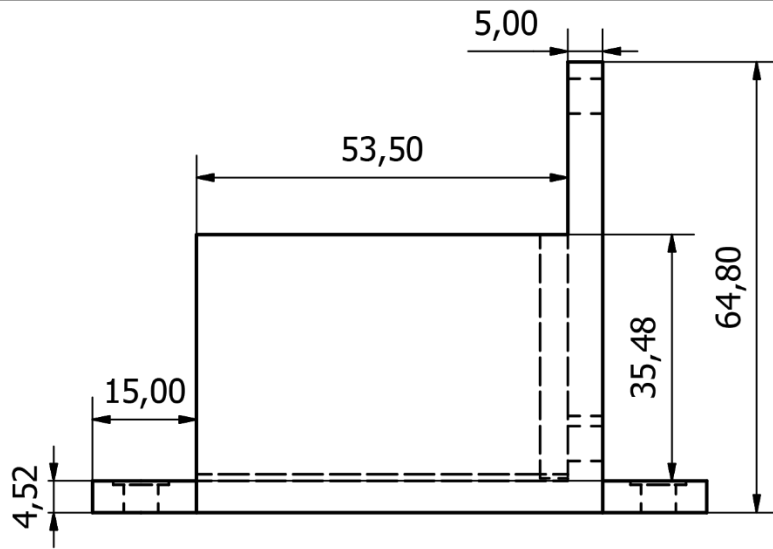


Diseñado por Julian Herrera Benavides	Revisado por Daniel Espitia Corredor	Director: David Herrera Alfonso	Fecha 10/01/2018	Plano N° 13
Departamento: Facultad de ingeniería mecatrónica		Proyecto: Robot Scara multifuncional		Escala 1:1
Nombre de la pieza: Soporte de rodamientos radiales 2			Material: PLA	Unidades: mm

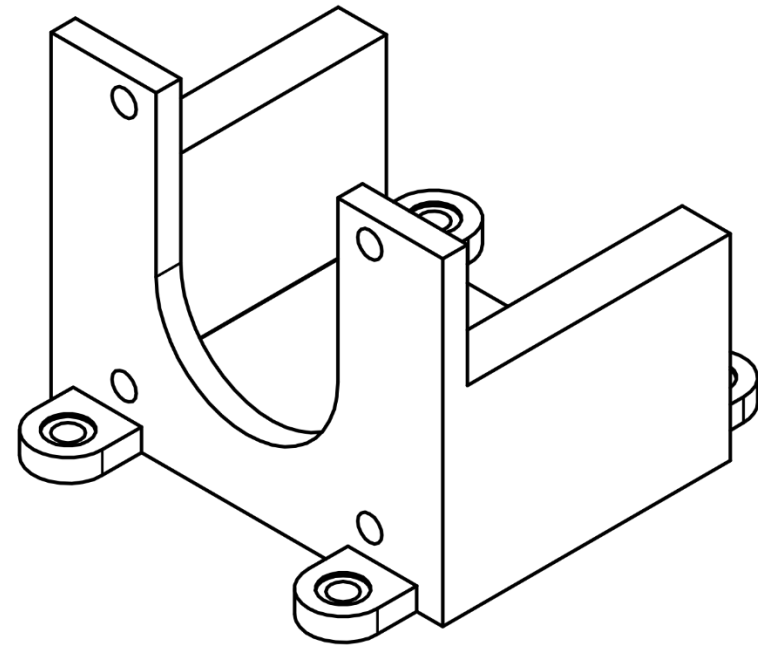




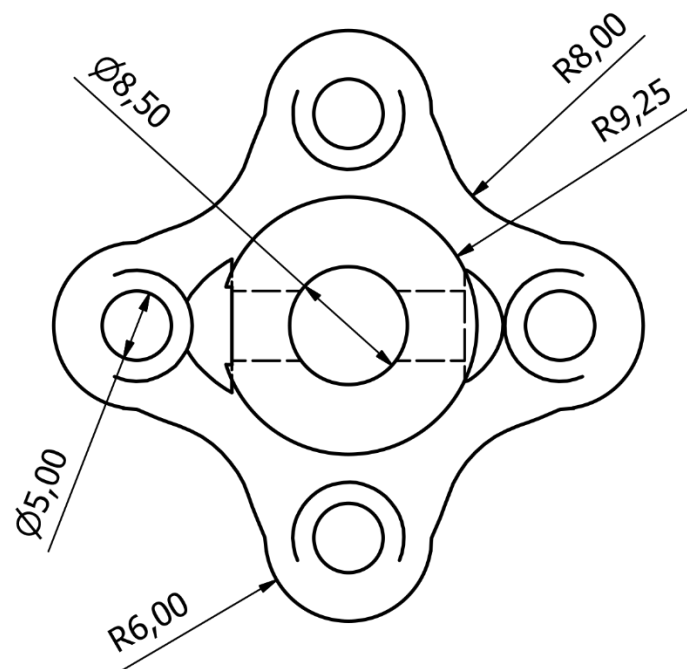
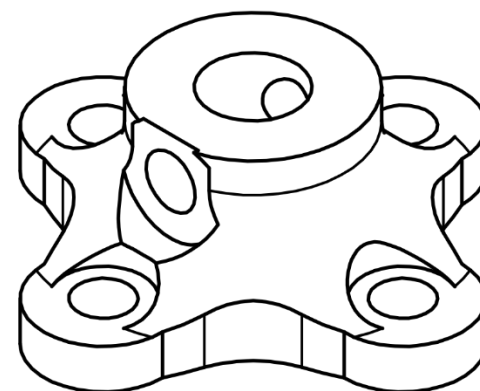
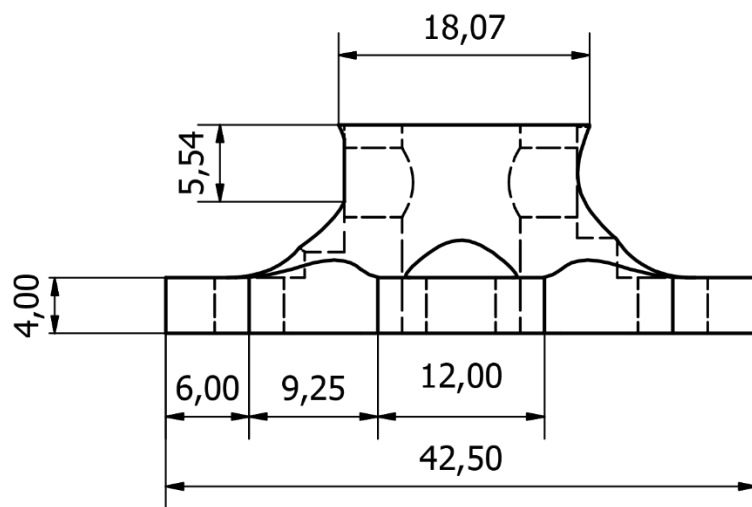
Diseñado por Julian Herrera Benavides	Revisado por Daniel Espitia Corredor	Director: David Herrera Alfonso	Fecha 10/01/2018	Plano N° 14
Departamento: Facultad de ingeniería mecatrónica		Proyecto: Robot Scara multifuncional		Escala 2:1
Nombre de la pieza: Encoder			Material: PLA	Unidades: mm



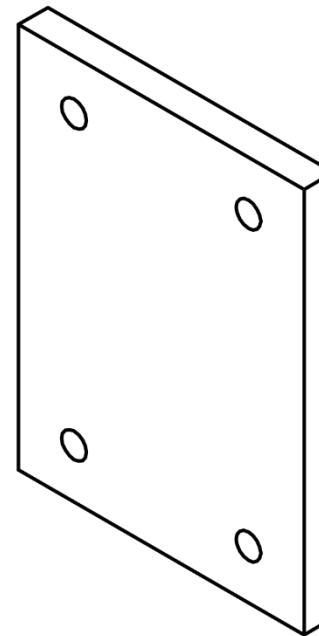
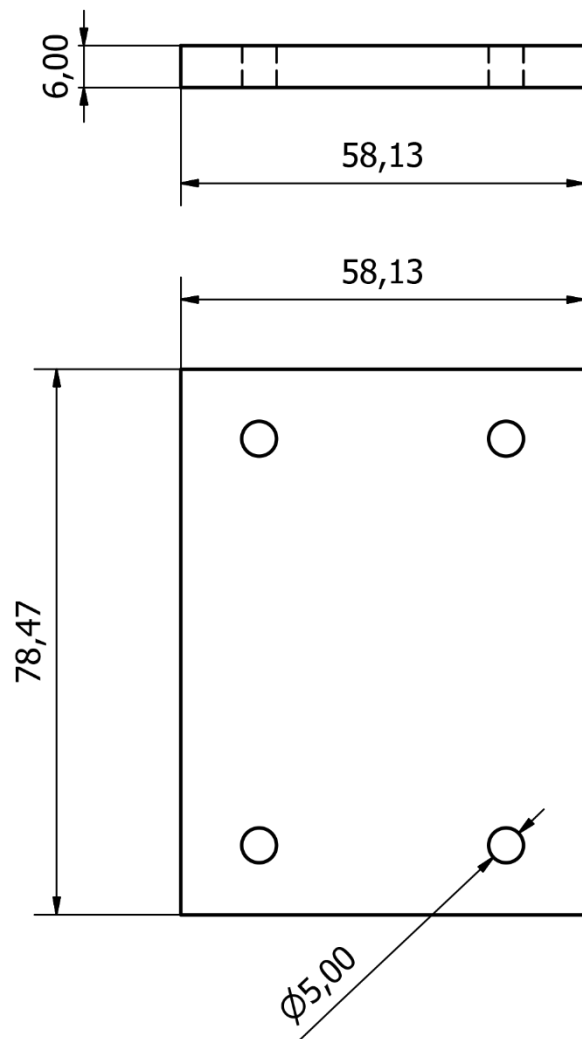
Escala 1:2



Diseñado por Julian Herrera Benavides	Revisado por Daniel Espitia Corredor	Director: David Herrera Alfonso	Fecha 10/01/2018	Plano N° 15
Departamento: Facultad de ingeniería mecatrónica		Proyecto: Robot Scara multifuncional		Escala 1:1
Nombre de la pieza: Soporte motor del eje Z			Material: PLA	Unidades: mm

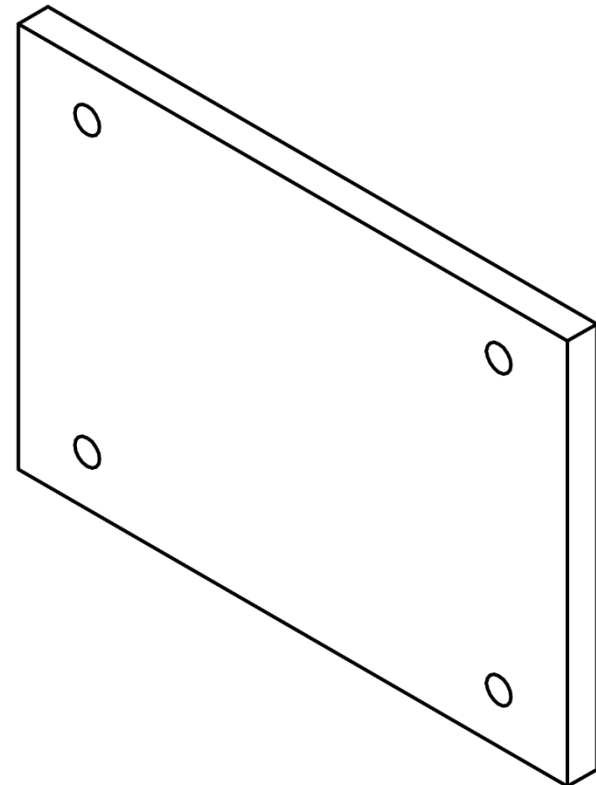
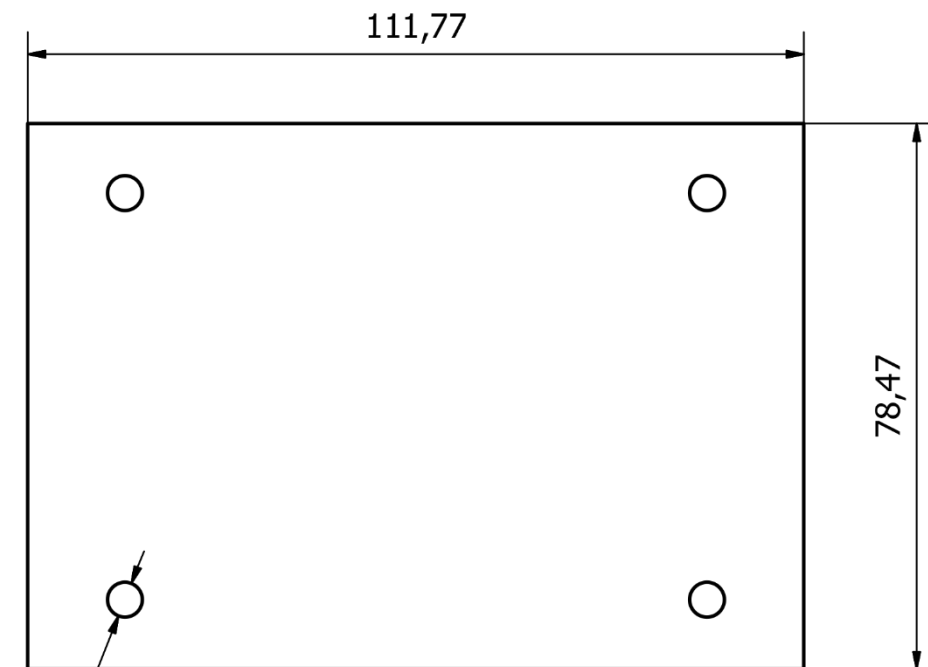
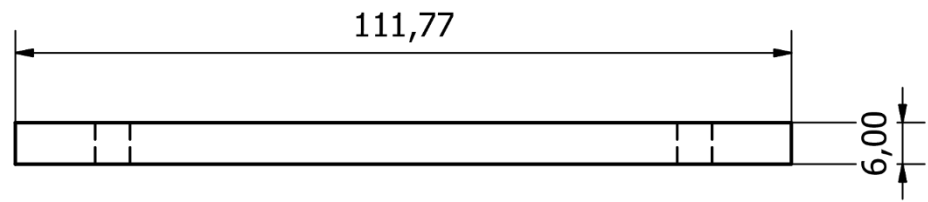


Diseñado por	Revisado por	Director:	Fecha	Plano N°
Julian Herrera Benavides	Daniel Espitia Corredor	David Herrera Alfonso	10/01/2018	16
Departamento:		Proyecto:		Escala
Facultad de ingeniería mecatrónica		Robot Scara multifuncional		2:1
Nombre de la pieza:			Material:	Unidades:
Sujetadores			PLA	mm



Diseñado por	Revisado por	Director:	Fecha	Plano N°
Julian Herrera Benavides	Daniel Espitia Corredor	David Herrera Alfonso	10/01/2018	17
Departamento:		Proyecto:	Escala	
Facultad de ingeniería mecatrónica		Robot Scara multifuncional	1:1	
Nombre de la pieza:			Material:	Unidades:
Viga externa soportes del eje Z			MDF	mm

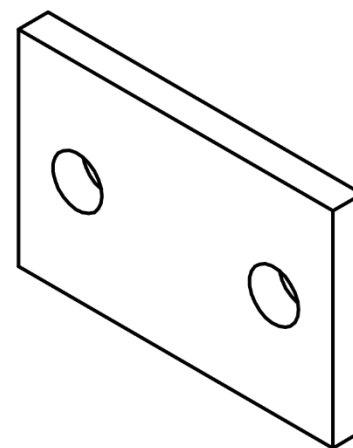
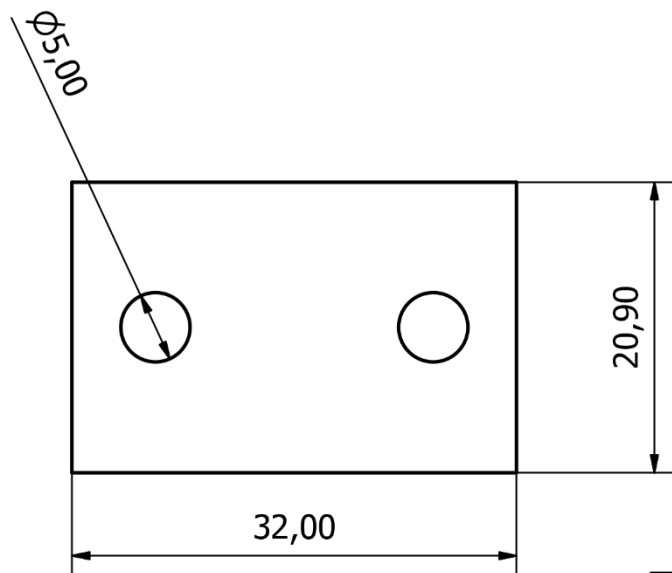
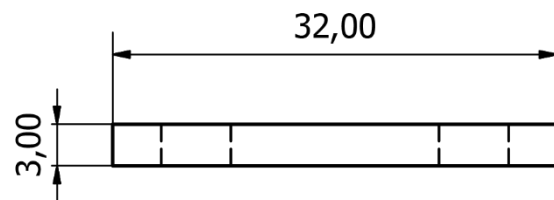




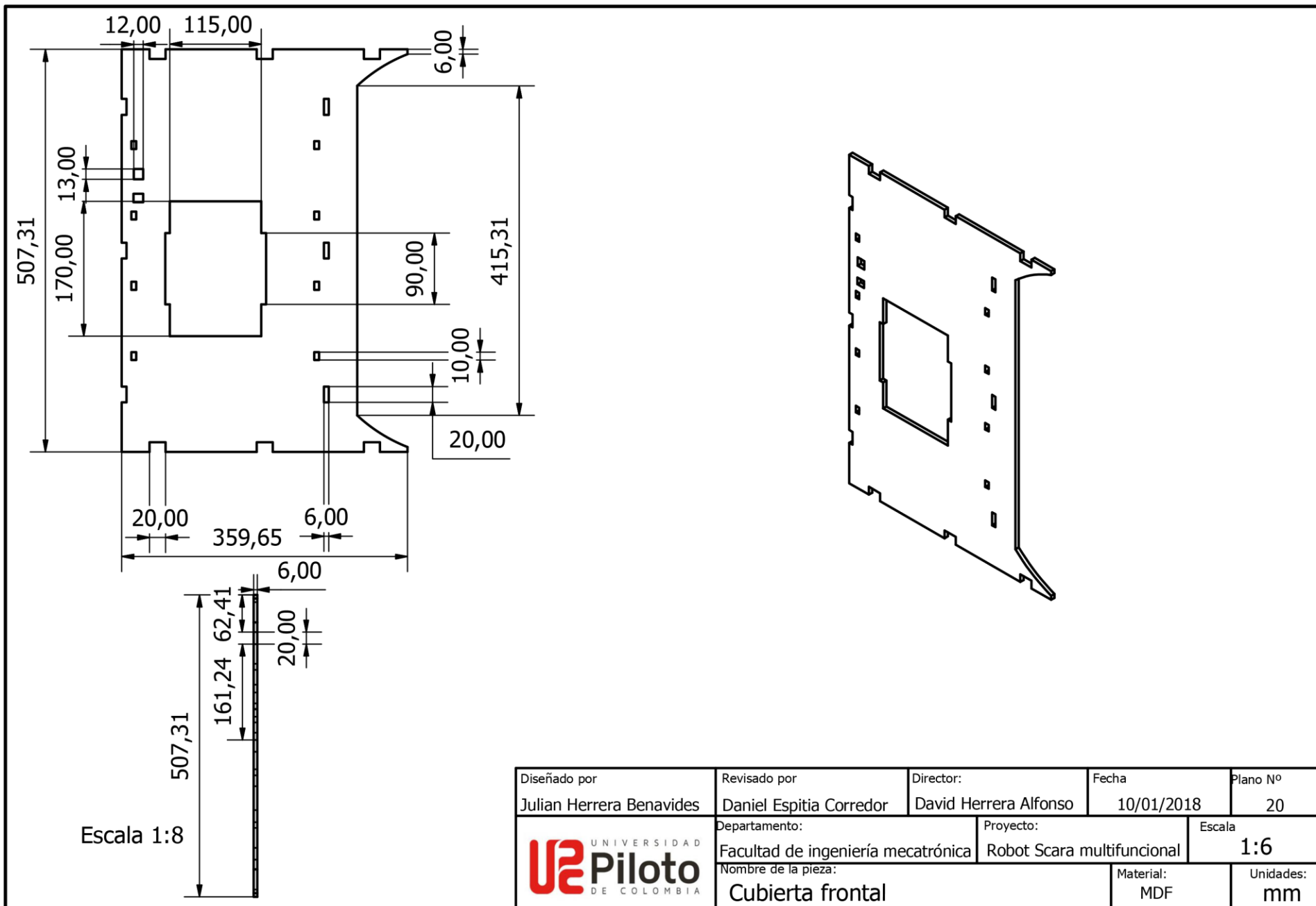
Ø5,00

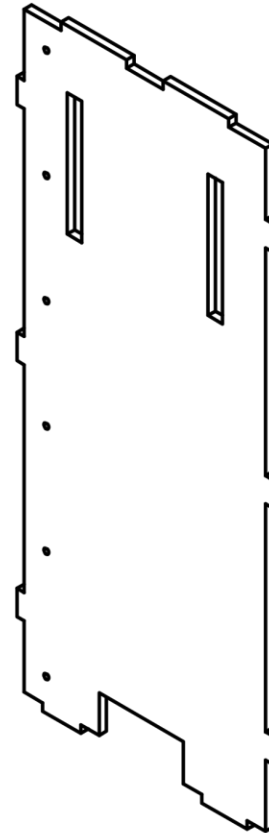
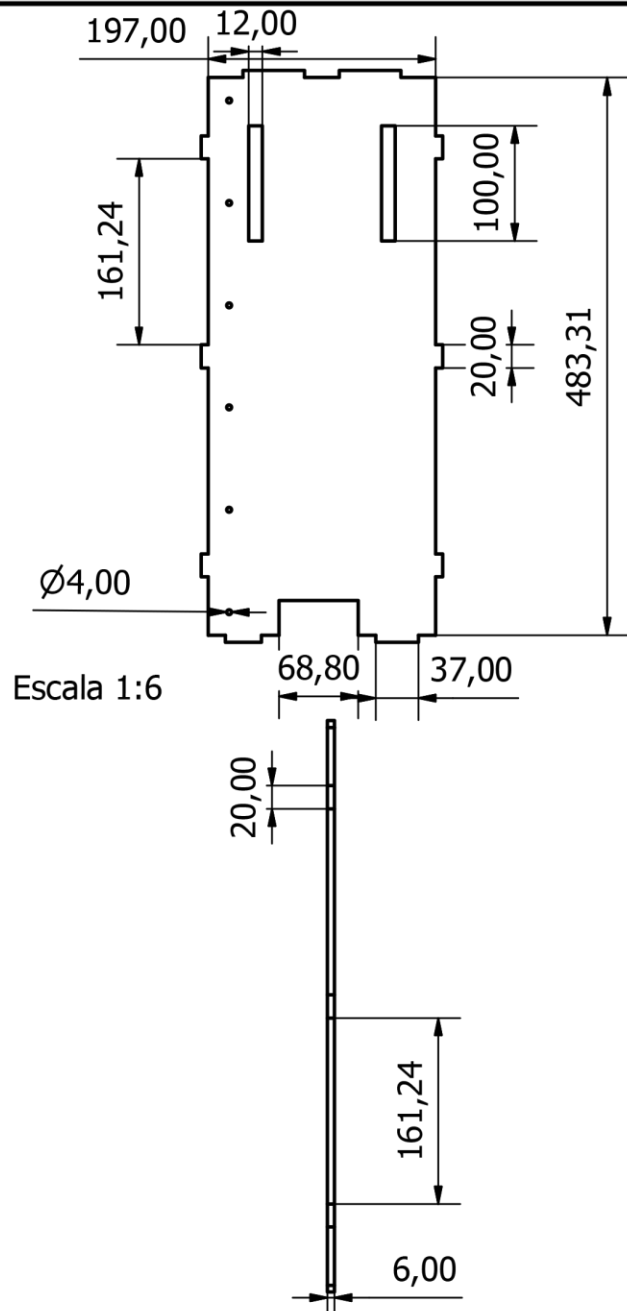
Diseñado por Julian Herrera Benavides	Revisado por Daniel Espitia Corredor	Director: David Herrera Alfonso	Fecha 10/01/2018	Plano N° 18
Departamento: Facultad de ingeniería mecatrónica		Proyecto: Robot Scara multifuncional		Escala 1:1
Nombre de la pieza: Viga interna soportes del eje Z			Material: MDF	Unidades: mm



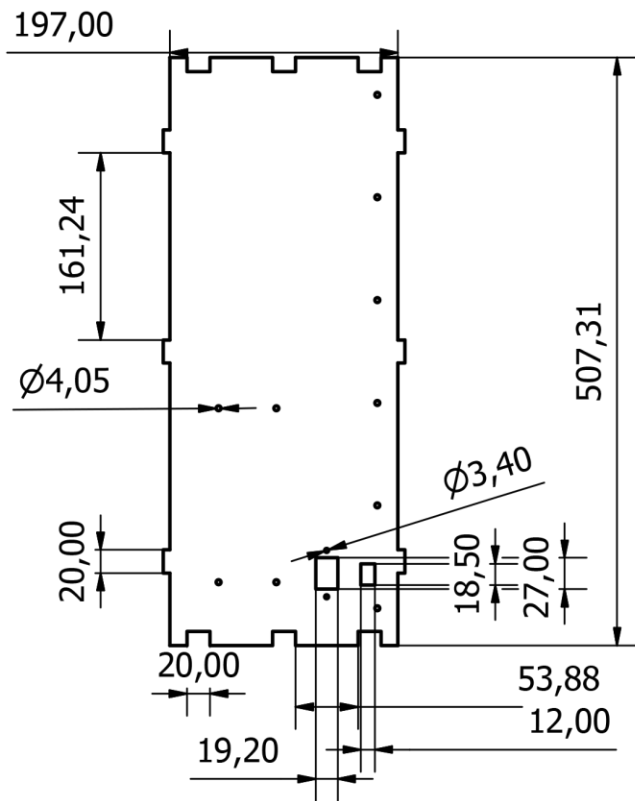


Diseñado por Julian Herrera Benavides	Revisado por Daniel Espitia Corredor	Director: David Herrera Alfonso	Fecha 10/01/2018	Plano N° 19
Departamento: Facultad de ingeniería mecatrónica		Proyecto: Robot Scara multifuncional		Escala 1:1
Nombre de la pieza: Sujetador de correas			Material: MDF	Unidades: mm





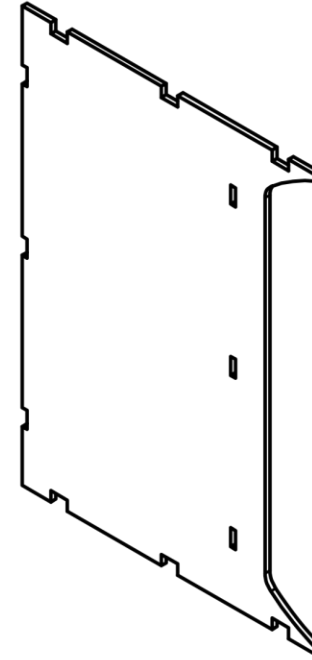
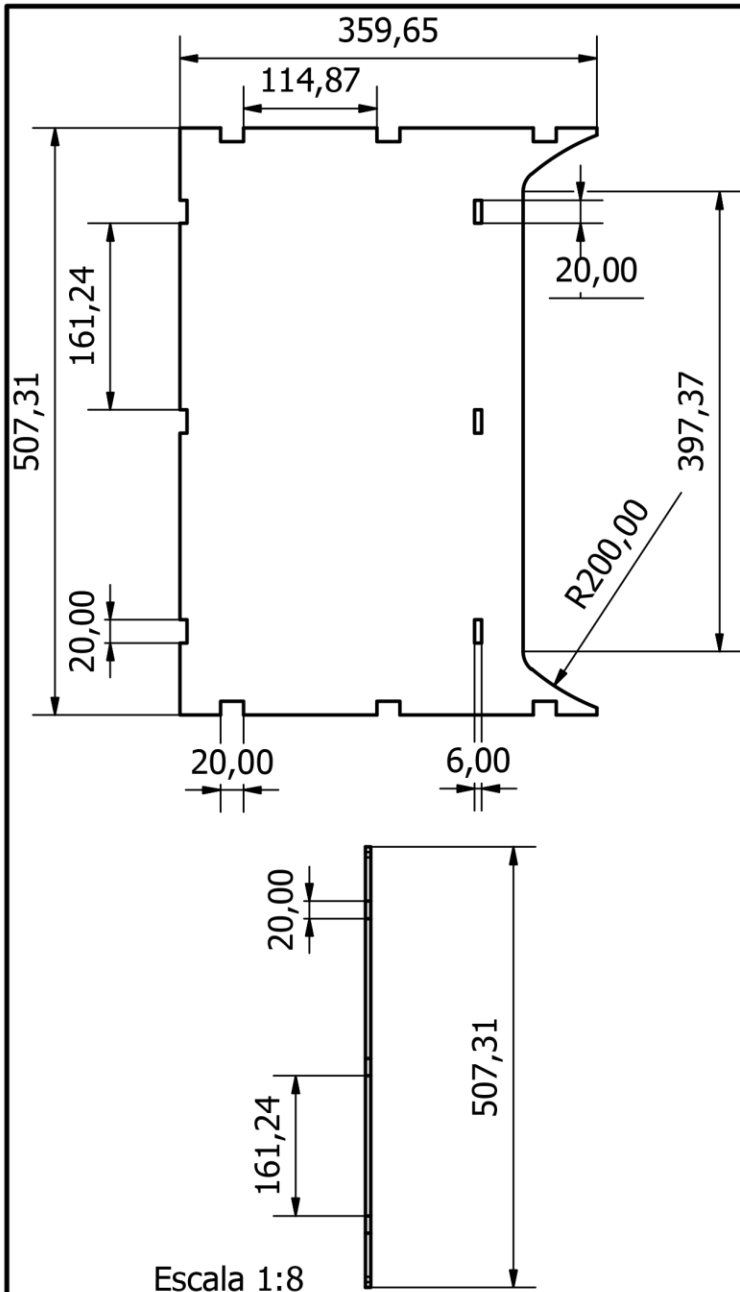
Diseñado por Julian Herrera Benavides	Revisado por Daniel Espitia Corredor	Director: David Herrera Alfonso	Fecha 10/01/2018	Plano N° 21
Departamento: Facultad de ingeniería mecatrónica		Proyecto: Robot Scara multifuncional		Escala 1:4
Nombre de la pieza: Cubierta lateral			Material: MDF	Unidades: mm



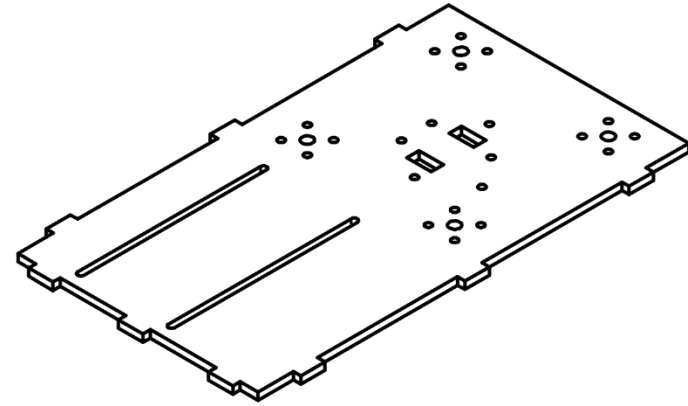
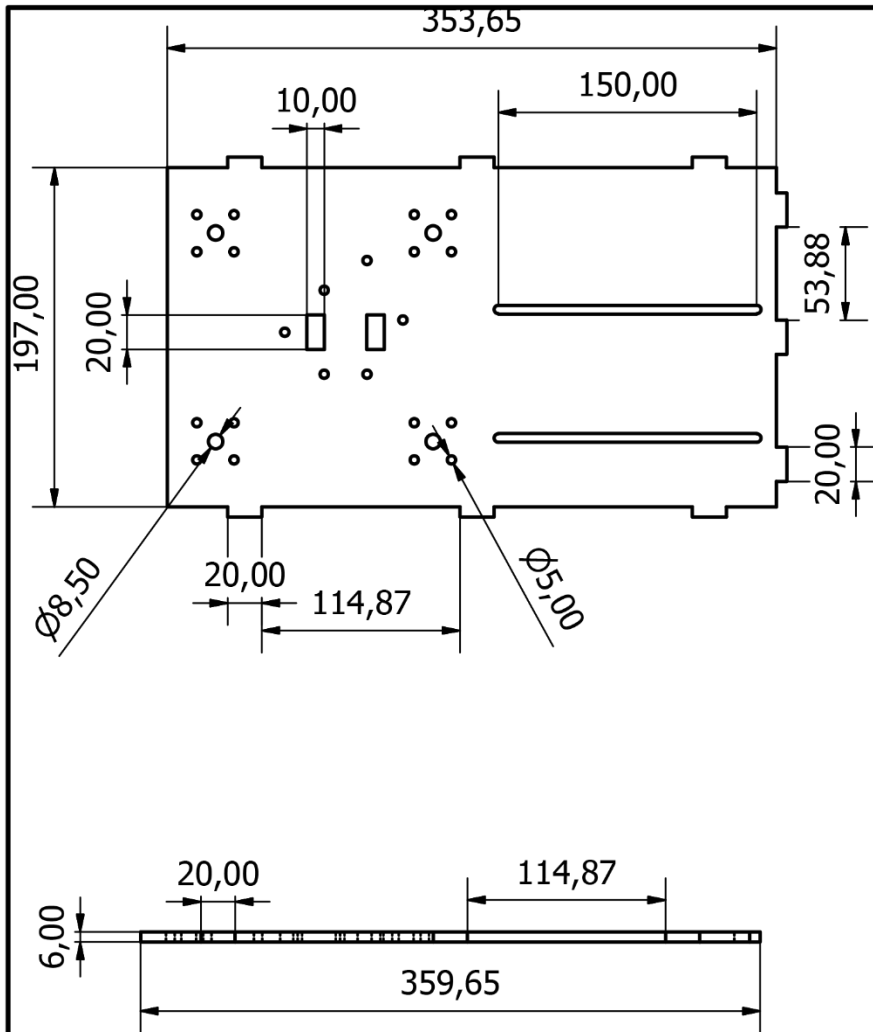
Escala 1:8

6,00

Diseñado por	Revisado por	Director:	Fecha	Plano N°
Julian Herrera Benavides	Daniel Espitia Corredor	David Herrera Alfonso	10/01/2018	22
Departamento:		Proyecto:	Escala	
Facultad de ingeniería mecatrónica		Robot Scara multifuncional	1:6	
Nombre de la pieza:			Material:	Unidades:
Cubierta lateral 2			MDF	mm

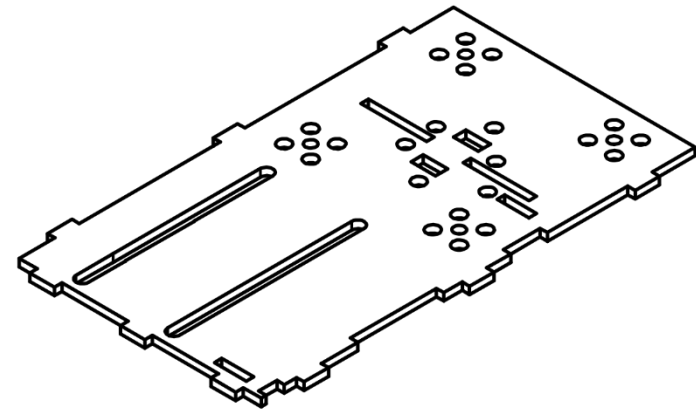
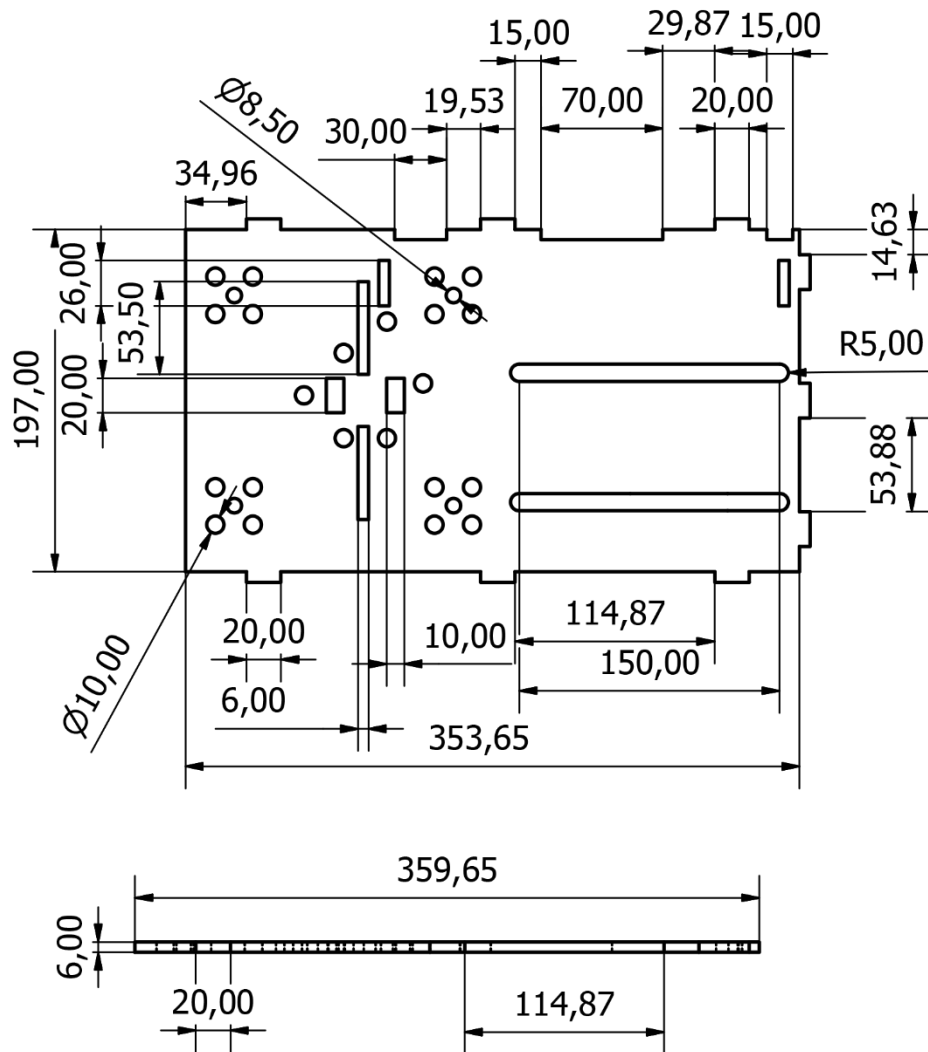


Diseñado por Julian Herrera Benavides	Revisado por Daniel Espitia Corredor	Director: David Herrera Alfonso	Fecha 10/01/2018	Plano N° 23
Departamento: Facultad de ingeniería mecatrónica		Proyecto: Robot Scara multifuncional		Escala 1:6
Nombre de la pieza: Cubierta posterior			Material: MDF	Unidades: mm

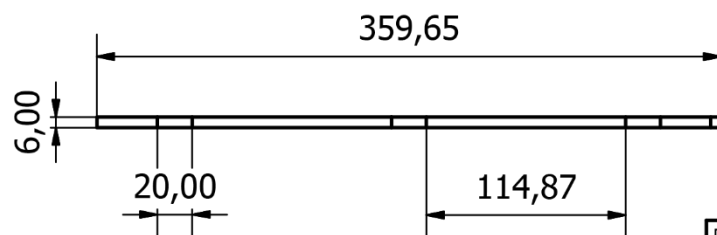
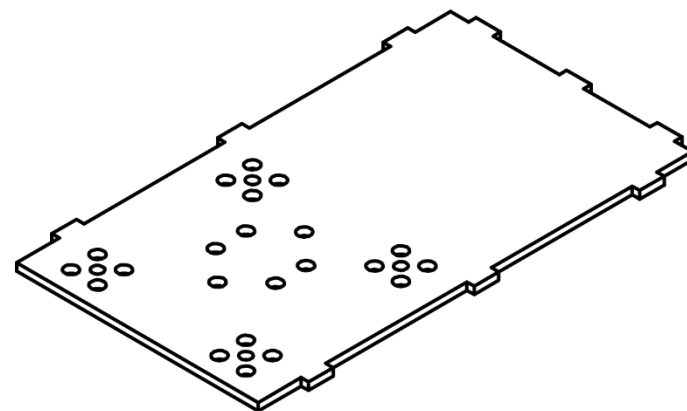
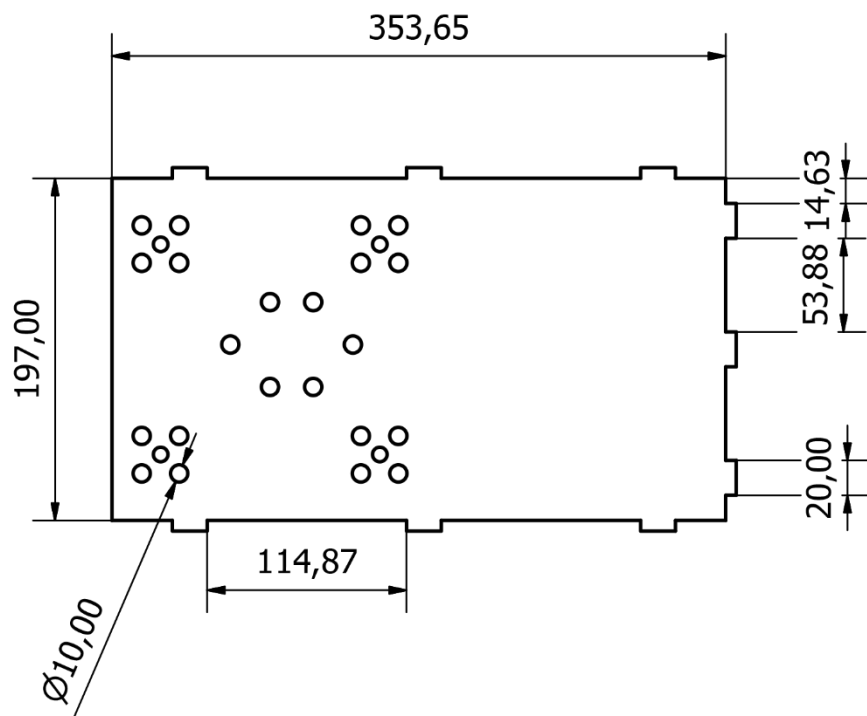


Diseñado por Julian Herrera Benavides	Revisado por Daniel Espitia Corredor	Director: David Herrera Alfonso	Fecha 10/01/2018	Plano N° 24
Departamento: Facultad de ingeniería mecatrónica		Proyecto: Robot Scara multifuncional		Escala 1:4
Nombre de la pieza: Cubierta Arriba 1			Material: MDF	Unidades: mm

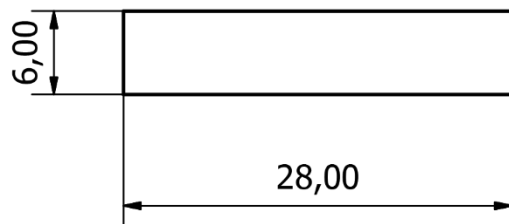
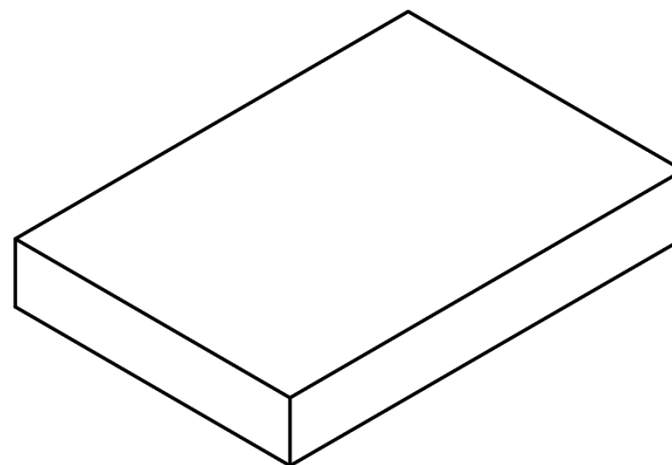
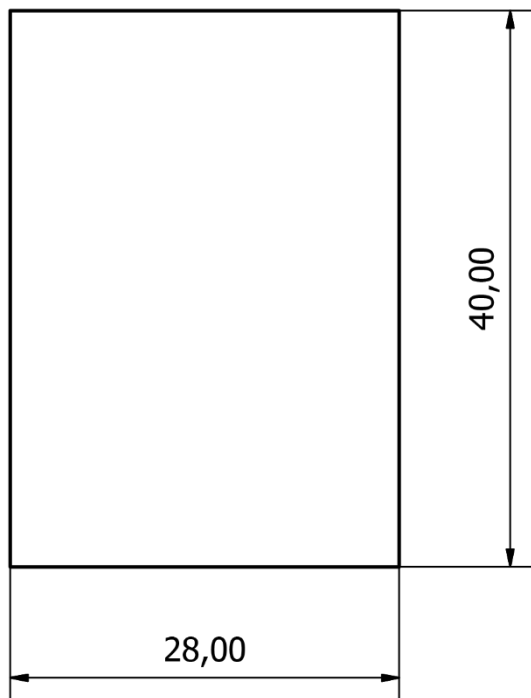




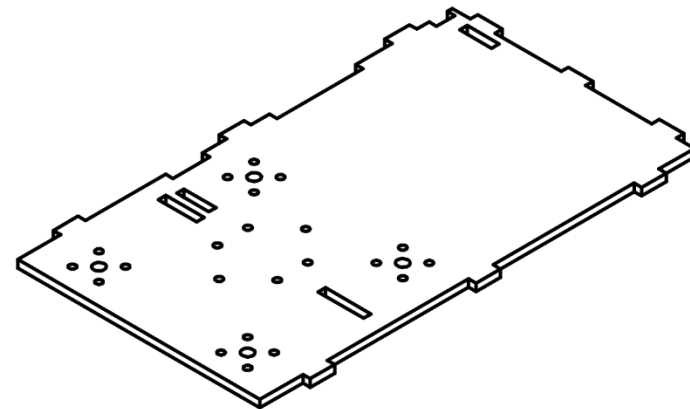
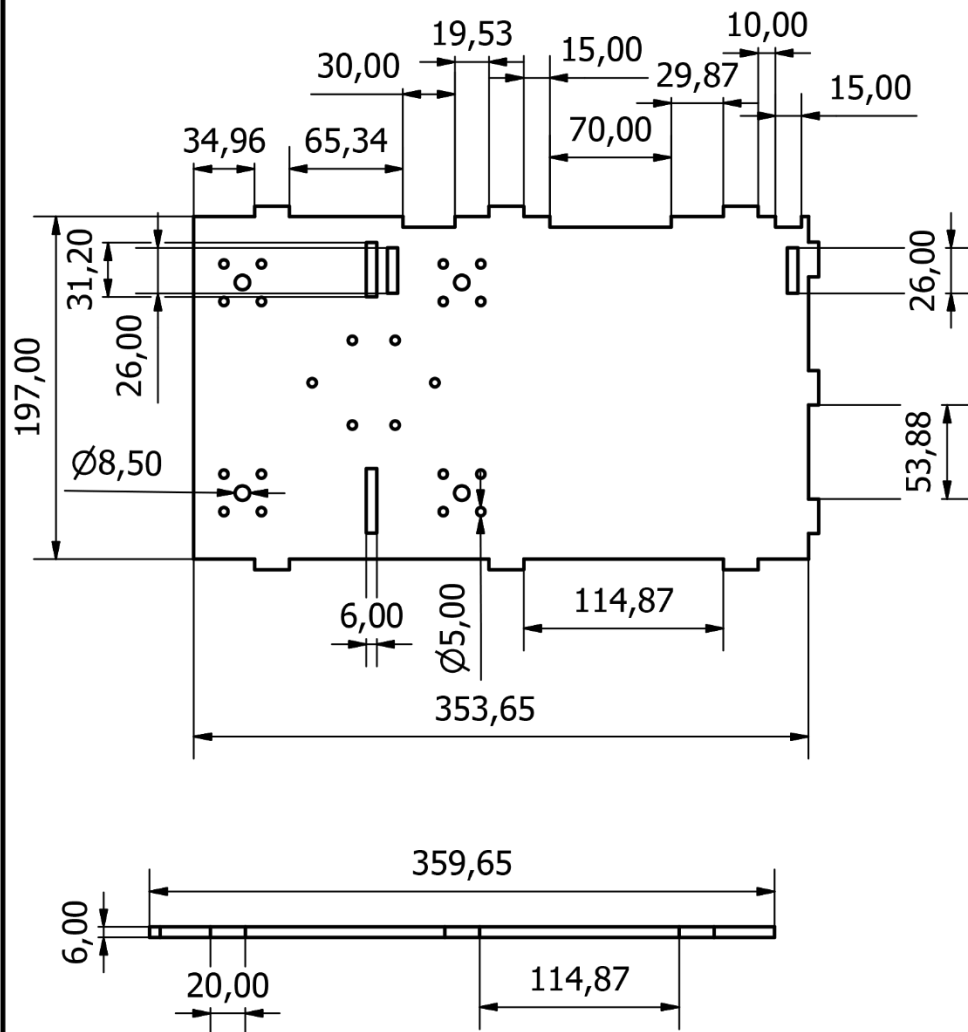
Diseñado por Julian Herrera Benavides	Revisado por Daniel Espitia Corredor	Director: David Herrera Alfonso	Fecha 10/01/2018	Plano N° 25
Departamento: Facultad de ingeniería mecatrónica		Proyecto: Robot Scara multifuncional		Escala 1:4
Nombre de la pieza: Cubierta Arriba 2			Material: MDF	Unidades: mm



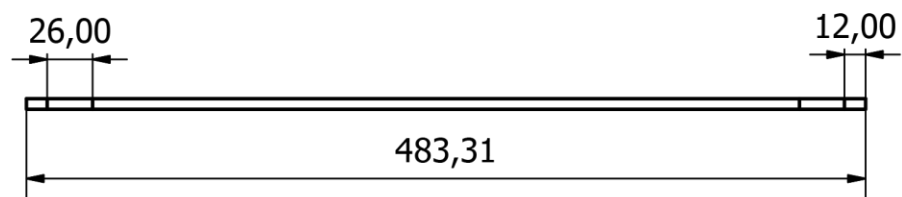
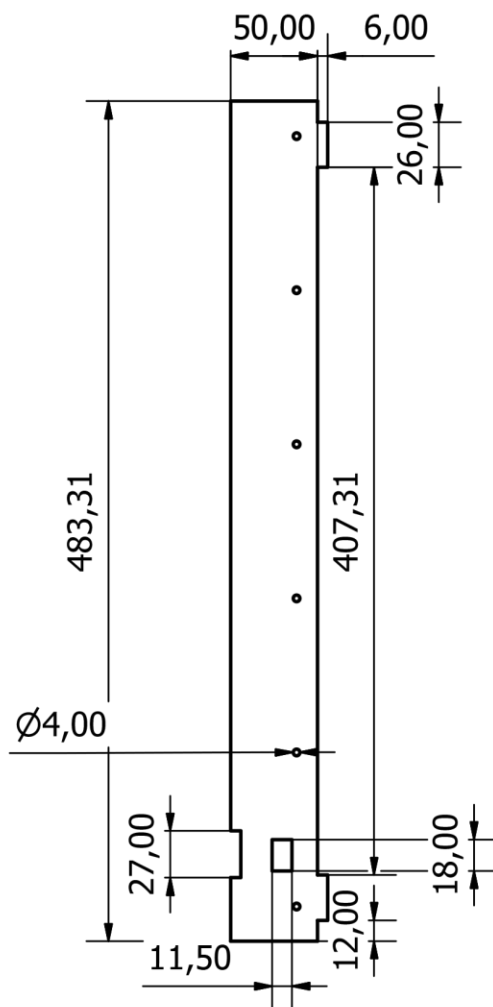
Diseñado por Julian Herrera Benavides	Revisado por Daniel Espitia Corredor	Director: David Herrera Alfonso	Fecha 10/01/2018	Plano N° 26
Departamento: Facultad de ingeniería mecatrónica		Proyecto: Robot Scara multifuncional		Escala 1:4
Nombre de la pieza: Cubierta Abajo			Material: MDF	Unidades: mm



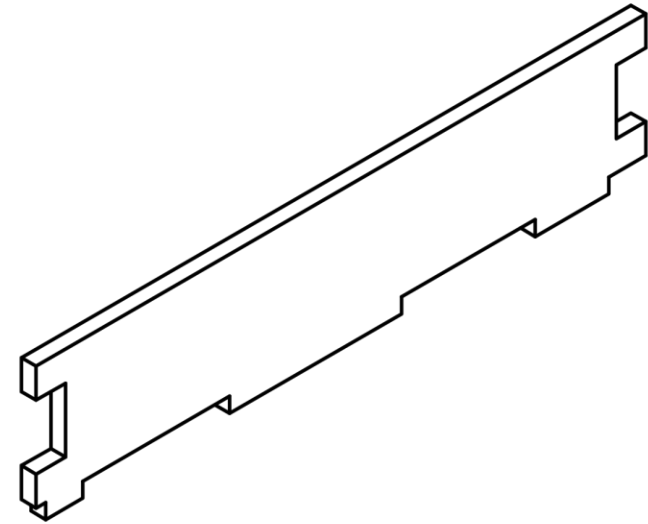
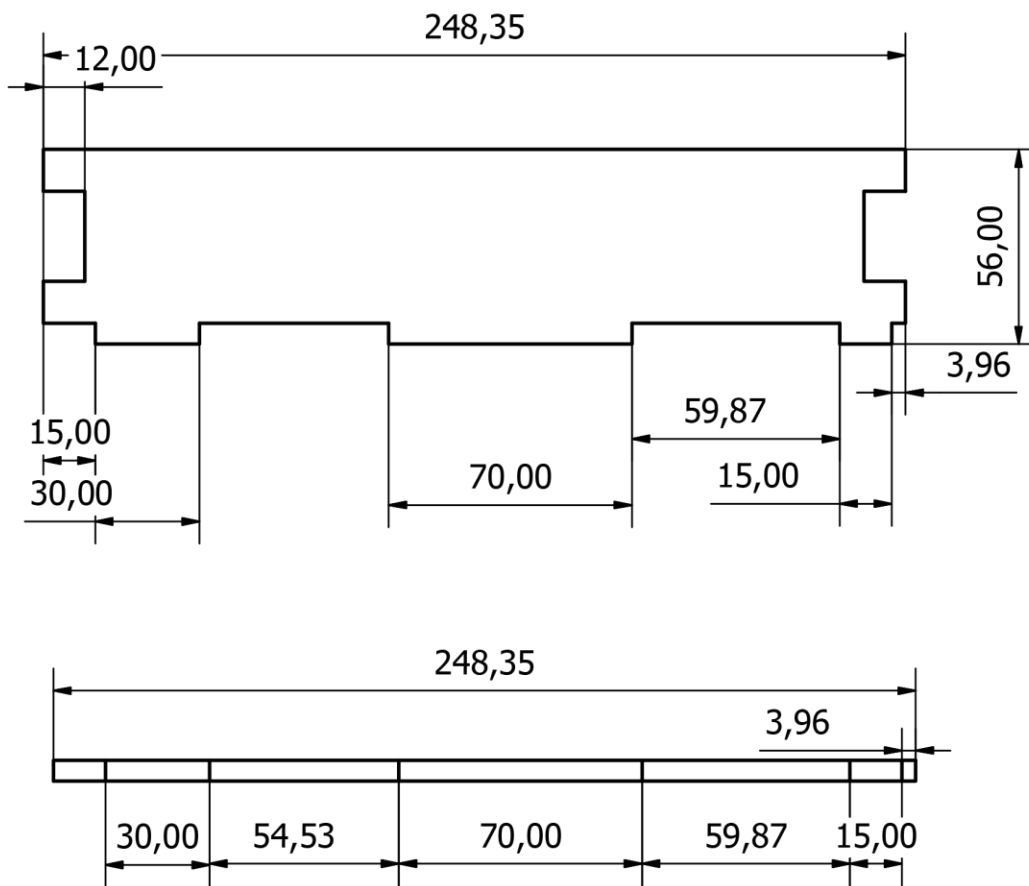
Diseñado por Julian Herrera Benavides	Revisado por Daniel Espitia Corredor	Director: David Herrera Alfonso	Fecha 10/01/2018	Plano N° 27
	Departamento: Facultad de ingeniería mecatrónica	Proyecto: Robot Scara multifuncional		Escala 2:1
	Nombre de la pieza: Base	Material: MDF		Unidades: mm



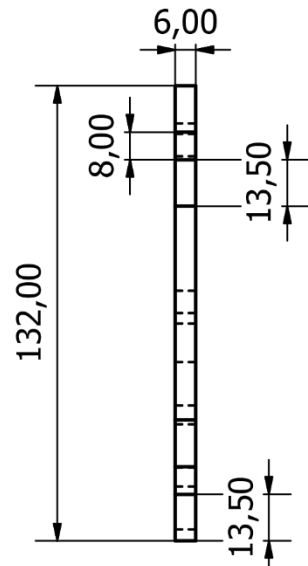
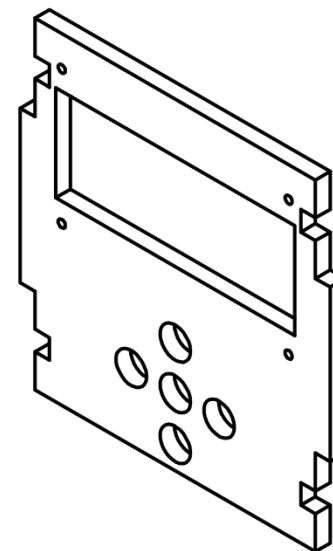
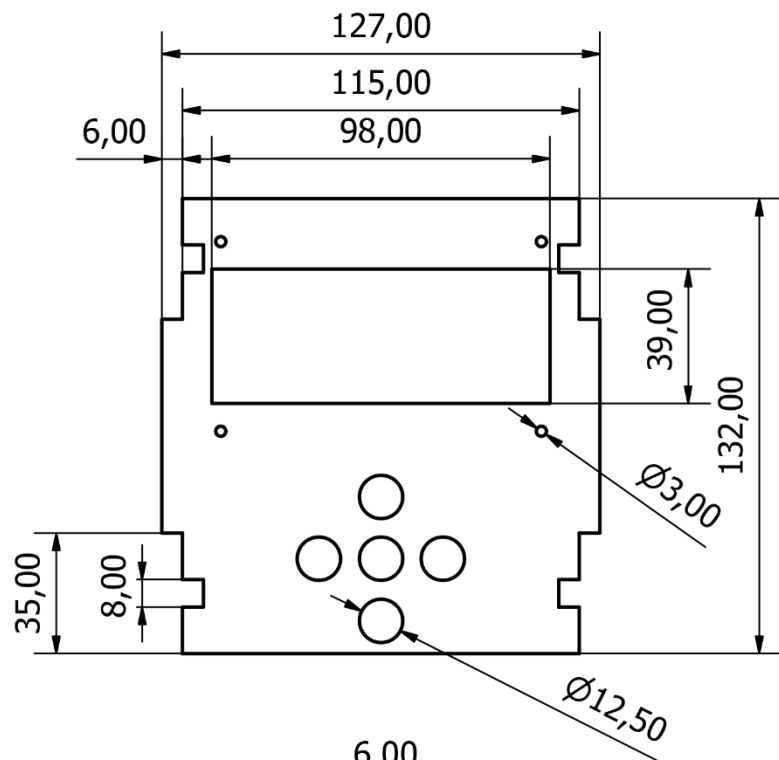
Diseñado por Julian Herrera Benavides	Revisado por Daniel Espitia Corredor	Director: David Herrera Alfonso	Fecha 10/01/2018	Plano N° 28
Departamento: Facultad de ingeniería mecatrónica		Proyecto: Robot Scara multifuncional		Escala 1:4
Nombre de la pieza: Cubierta Abajo 2			Material: MDF	Unidades: mm



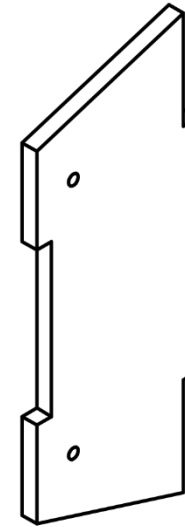
Diseñado por Julian Herrera Benavides	Revisado por Daniel Espitia Corredor	Director: David Herrera Alfonso	Fecha 10/01/2018	Plano N° 29
Departamento: Facultad de ingeniería mecatrónica		Proyecto: Robot Scara multifuncional		Escala 1:4
Nombre de la pieza: Apoyo de cubierta 1			Material: MDF	Unidades: mm




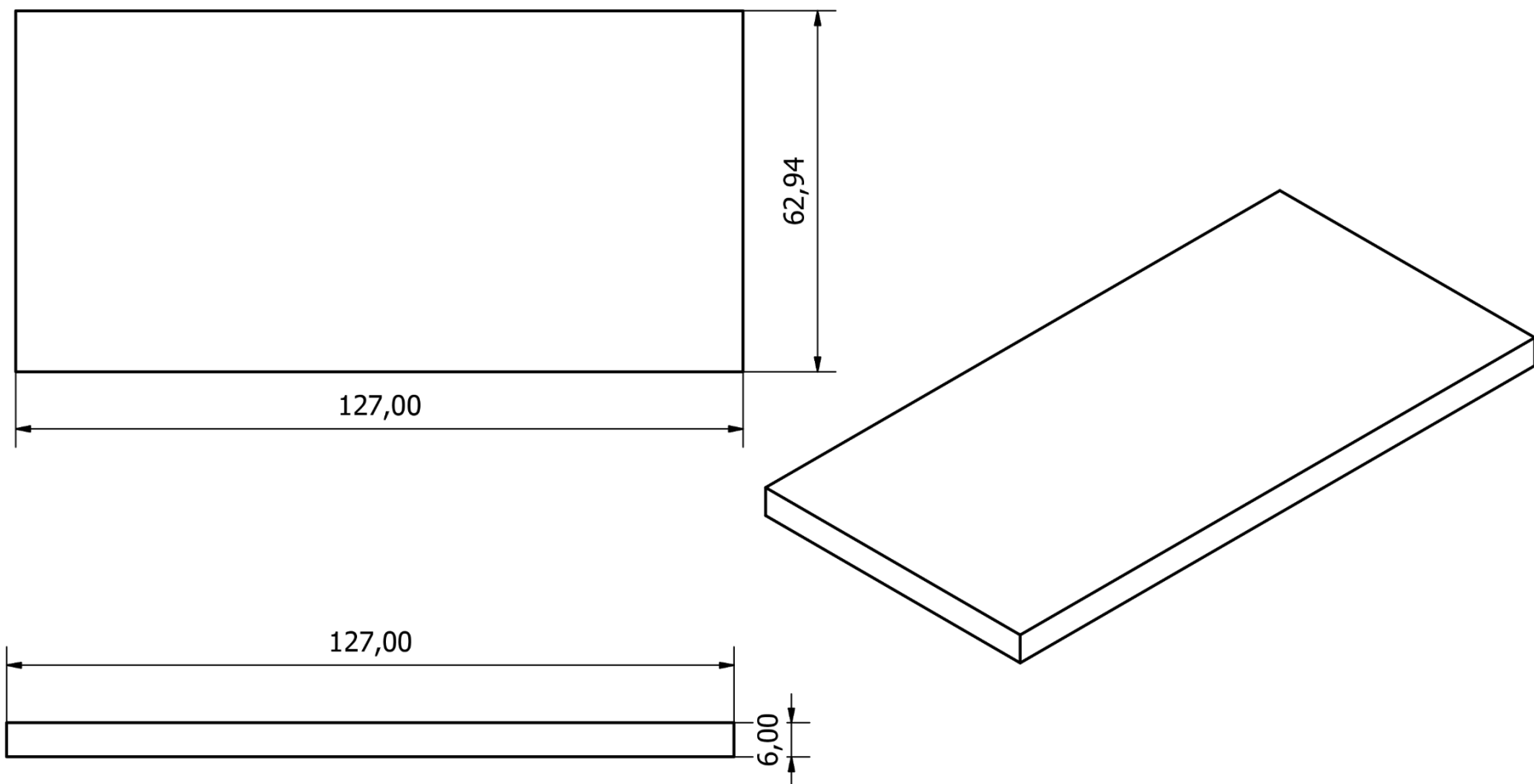
Diseñado por Julian Herrera Benavides	Revisado por Daniel Espitia Corredor	Director: David Herrera Alfonso	Fecha 10/01/2018	Plano N° 30
Departamento: Facultad de ingeniería mecatrónica		Proyecto: Robot Scara multifuncional		Escala 1:2
Nombre de la pieza: Apoyo de cubierta 2			Material: MDF	Unidades: mm




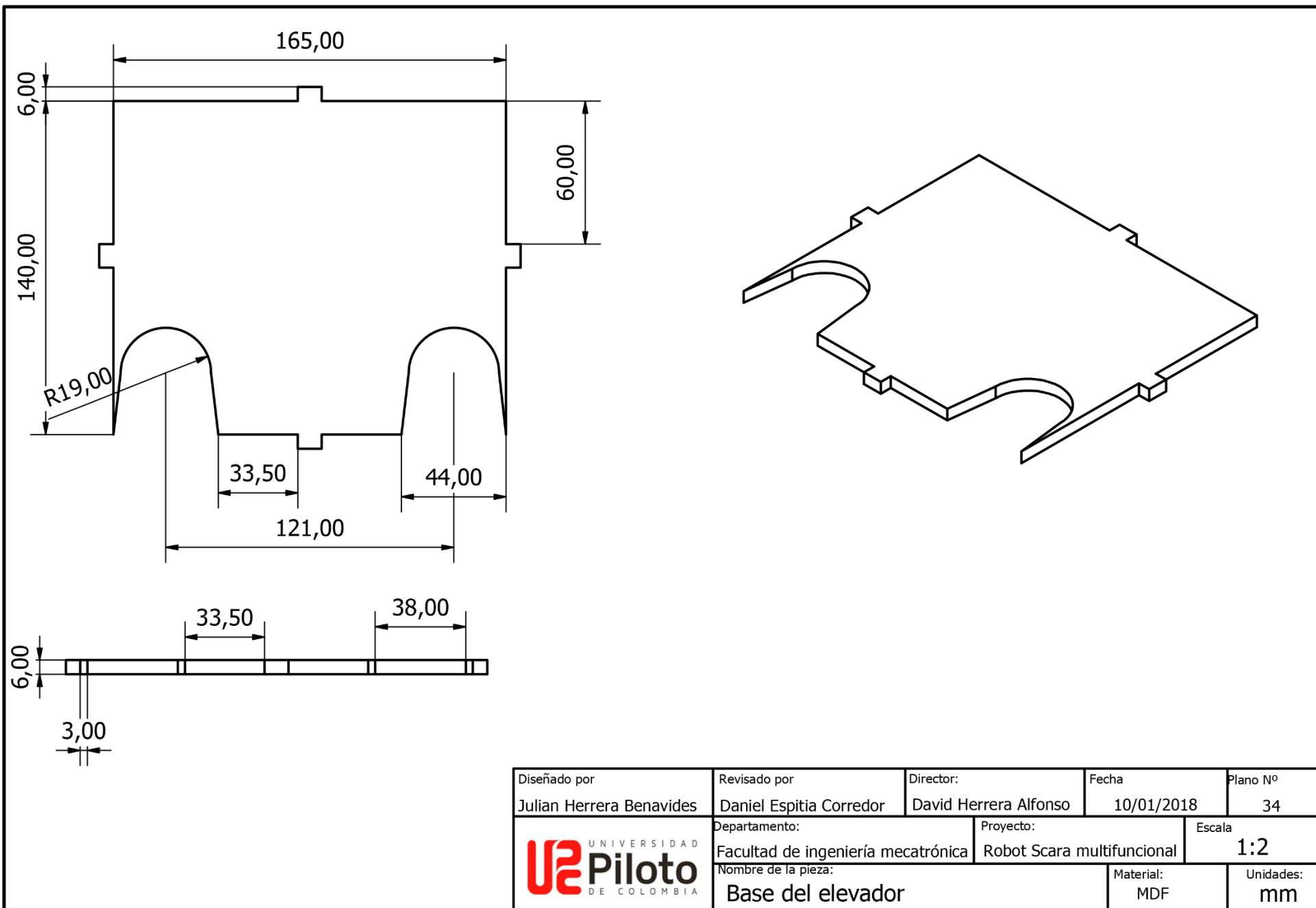
Diseñado por	Revisado por	Director:	Fecha	Plano N°
Julian Herrera Benavides	Daniel Espitia Corredor	David Herrera Alfonso	10/01/2018	31
Departamento:		Proyecto:	Escala	
Facultad de ingeniería mecatrónica		Robot Scara multifuncional	1:2	
Nombre de la pieza:			Material:	Unidades:
Cubierta Lcd y botones			MDF	mm

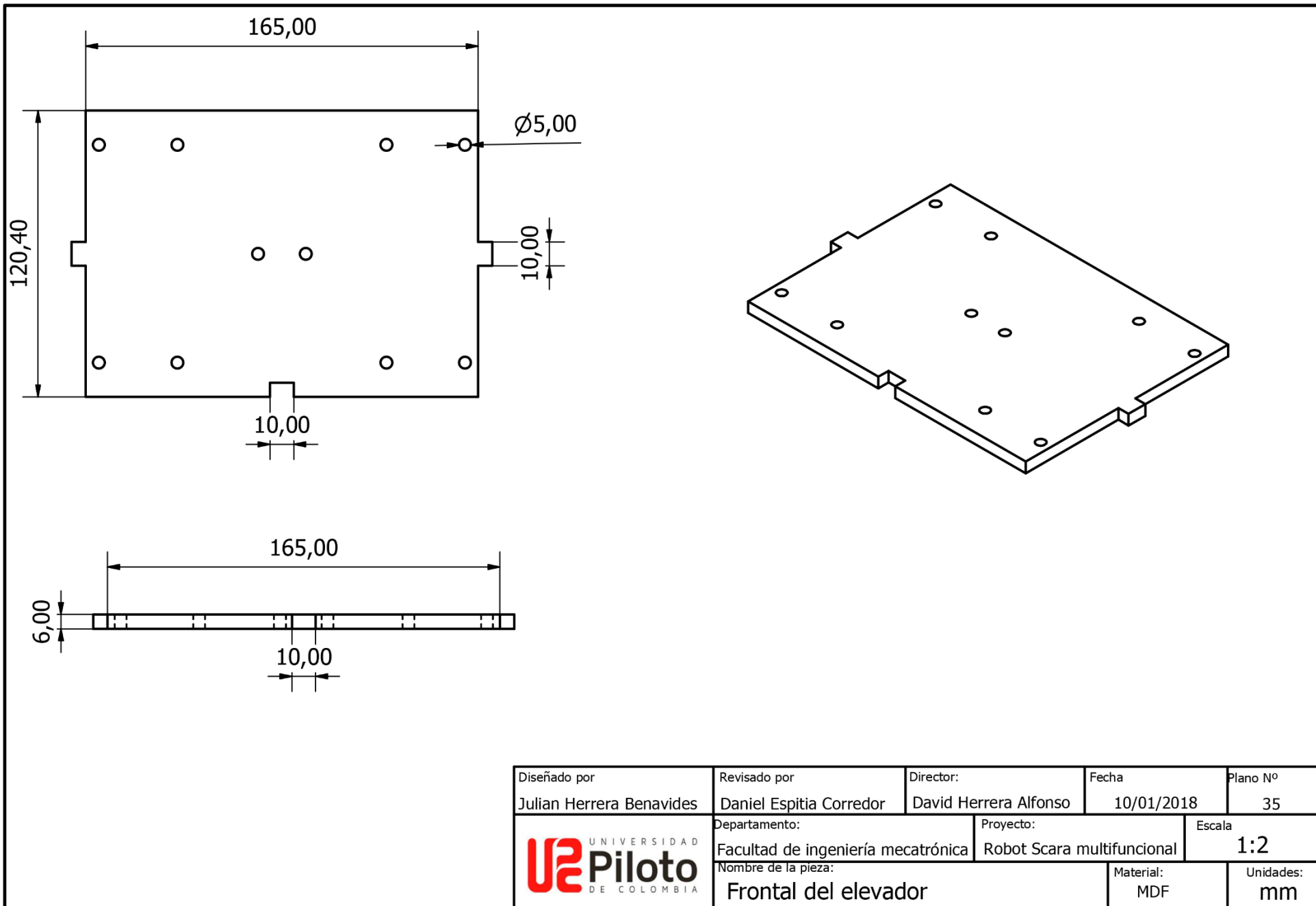


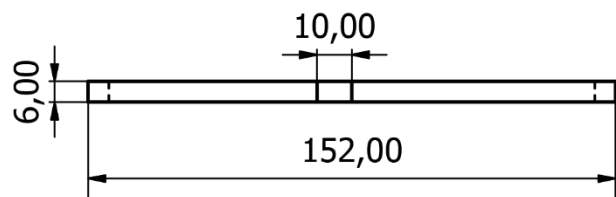
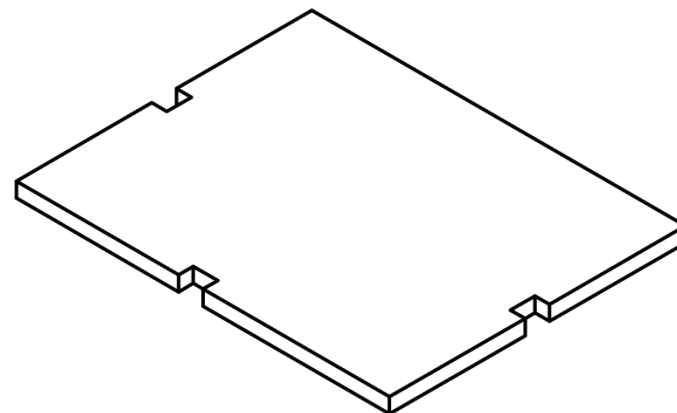
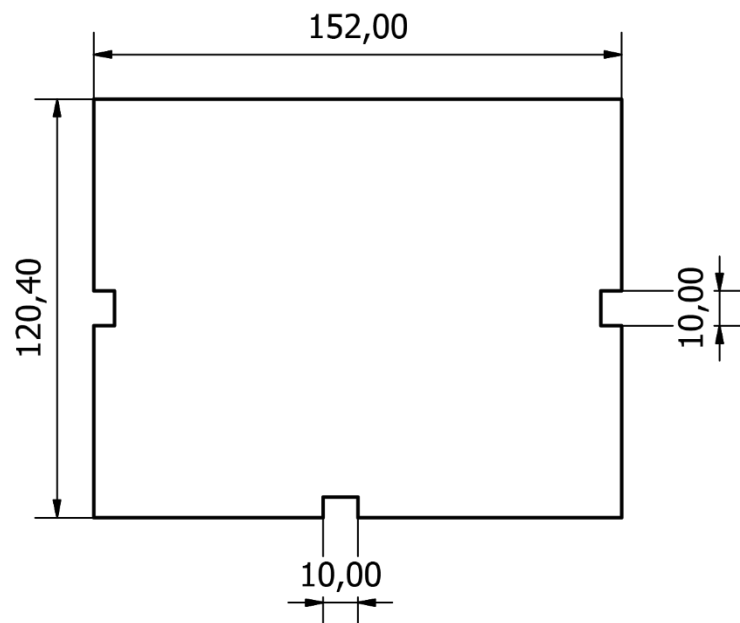
Diseñado por	Revisado por	Director:	Fecha	Plano N°
Julian Herrera Benavides	Daniel Espitia Corredor	David Herrera Alfonso	10/01/2018	32
	Departamento:	Proyecto:	Escala	
	Facultad de ingeniería mecatrónica	Robot Scara multifuncional	1:2	
	Nombre de la pieza:	Material:	Unidades:	
	Laterales Lcd	MDF	mm	



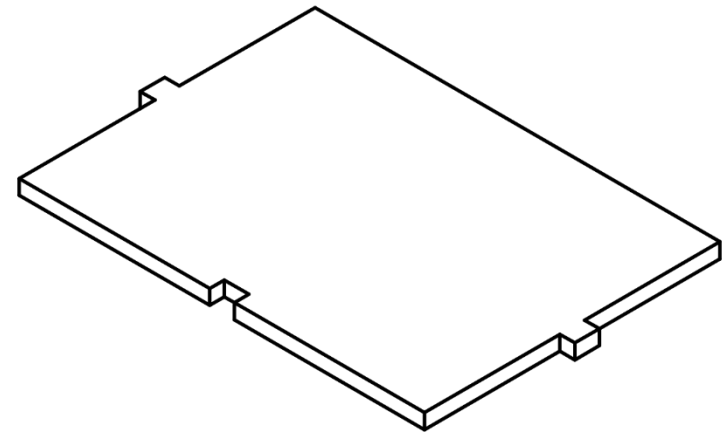
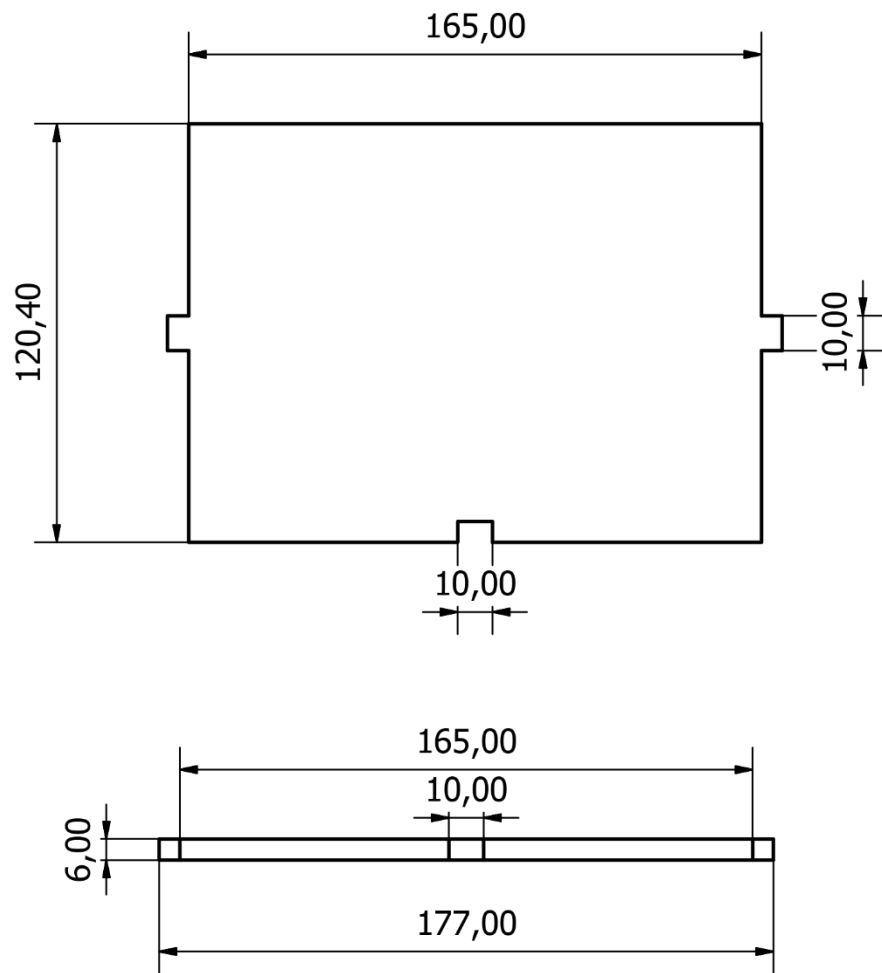
Diseñado por Julian Herrera Benavides	Revisado por Daniel Espitia Corredor	Director: David Herrera Alfonso	Fecha 10/01/2018	Plano N° 33
	Departamento: Facultad de ingeniería mecatrónica	Proyecto: Robot Scara multifuncional	Escala 1:1	
	Nombre de la pieza: Posterior Lcd	Material: MDF	Unidades: mm	



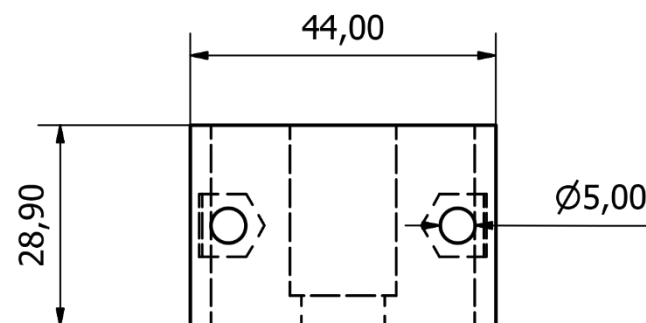
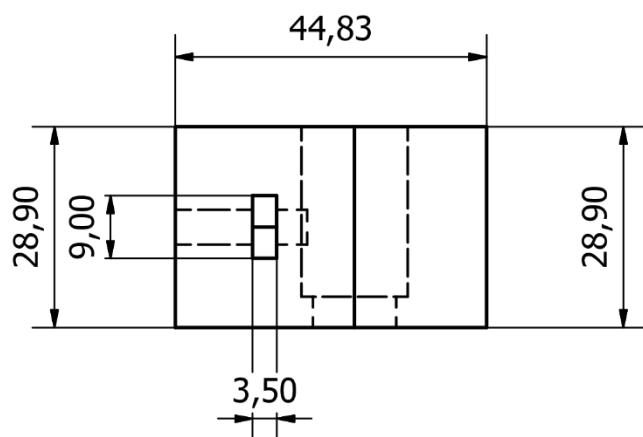
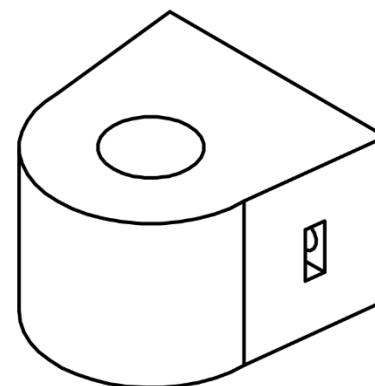
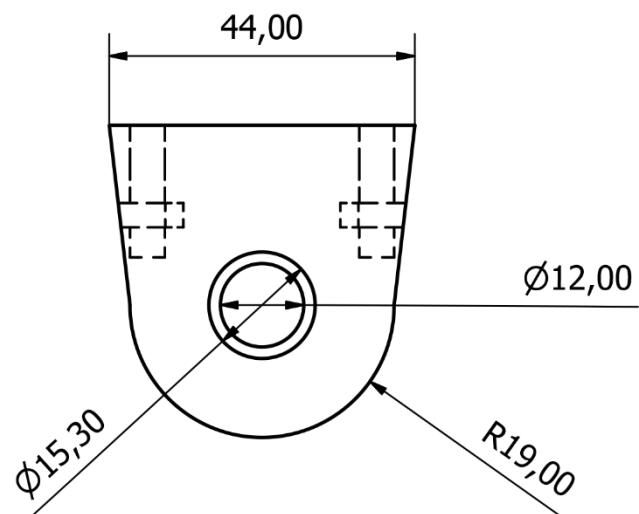




Diseñado por Julian Herrera Benavides	Revisado por Daniel Espitia Corredor	Director: David Herrera Alfonso	Fecha 10/01/2018	Plano N° 36
Departamento: Facultad de ingeniería mecatrónica		Proyecto: Robot Scara multifuncional		Escala 1:2
Nombre de la pieza: Laterales del elevador			Material: MDF	Unidades: mm

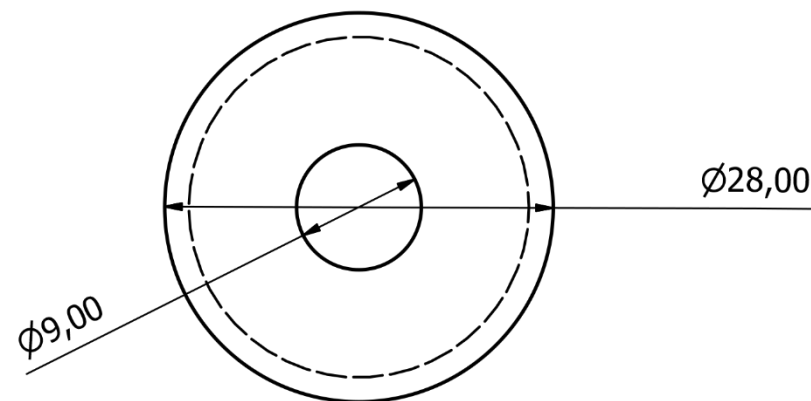
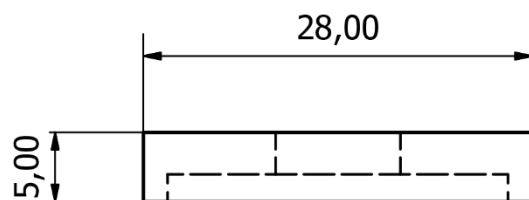
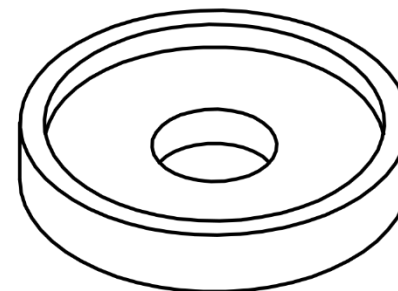
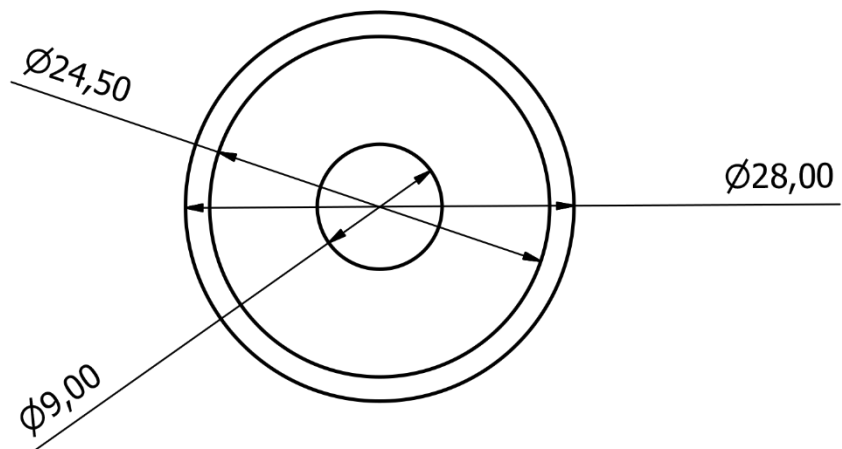


Diseñado por Julian Herrera Benavides	Revisado por Daniel Espitia Corredor	Director: David Herrera Alfonso	Fecha 10/01/2018	Plano N° 37
Departamento: Facultad de ingeniería mecatrónica		Proyecto: Robot Scara multifuncional		Escala 1:2
Nombre de la pieza: Posterior del elevador			Material: MDF	Unidades: mm

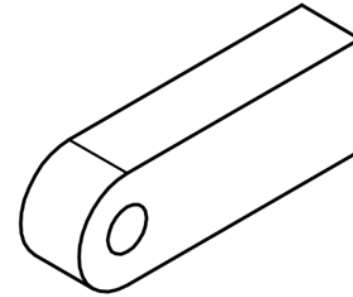
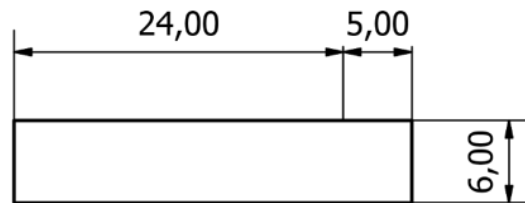
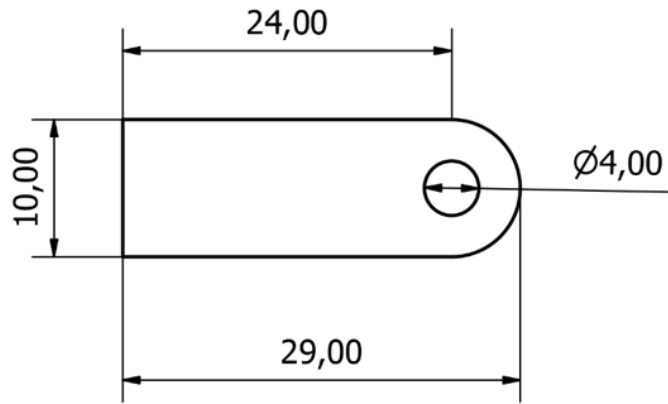



Diseñado por	Revisado por	Director:	Fecha	Plano N°
Julian Herrera Benavides	Daniel Espitia Corredor	David Herrera Alfonso	10/01/2018	38
Departamento:		Proyecto:		Escala
Facultad de ingeniería mecatrónica		Robot Scara multifuncional		1:1
Nombre de la pieza:			Material:	Unidades:
Acoplador de rodamientos lineales			PLA	mm

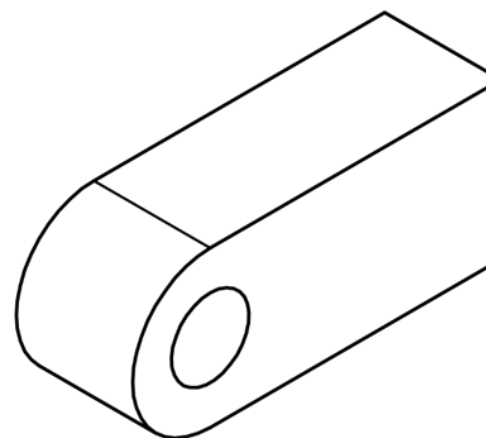
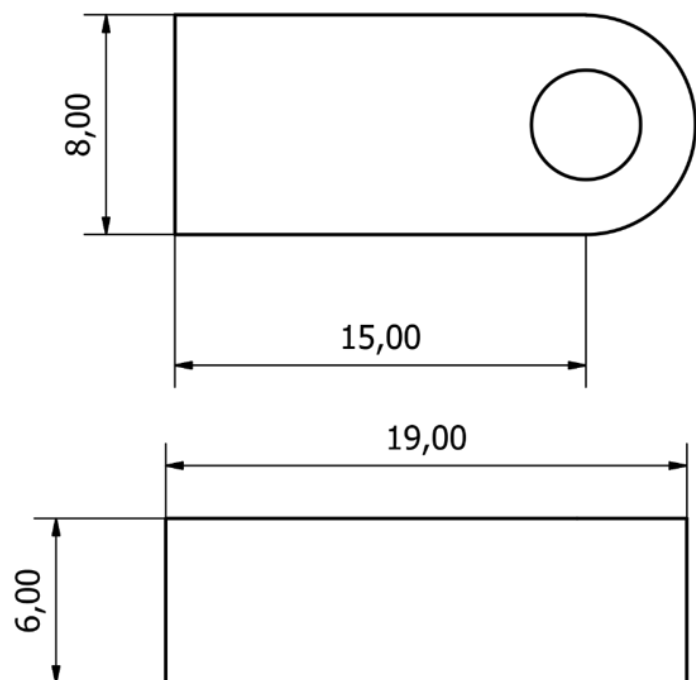





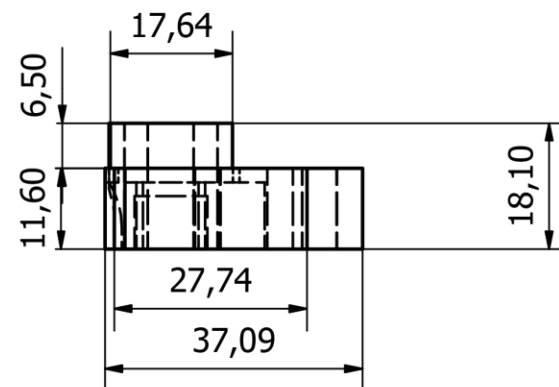
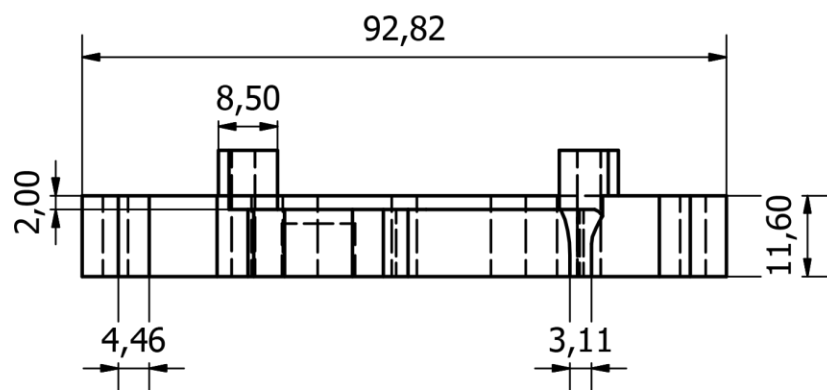
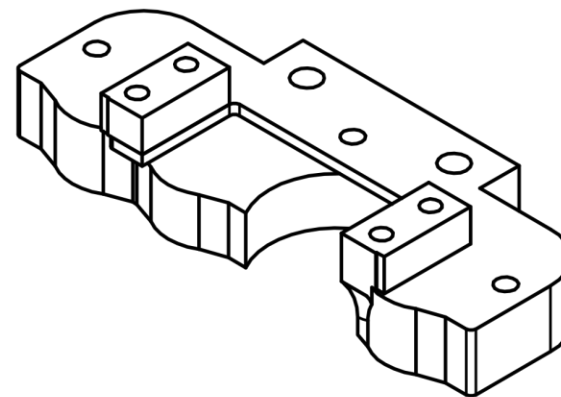
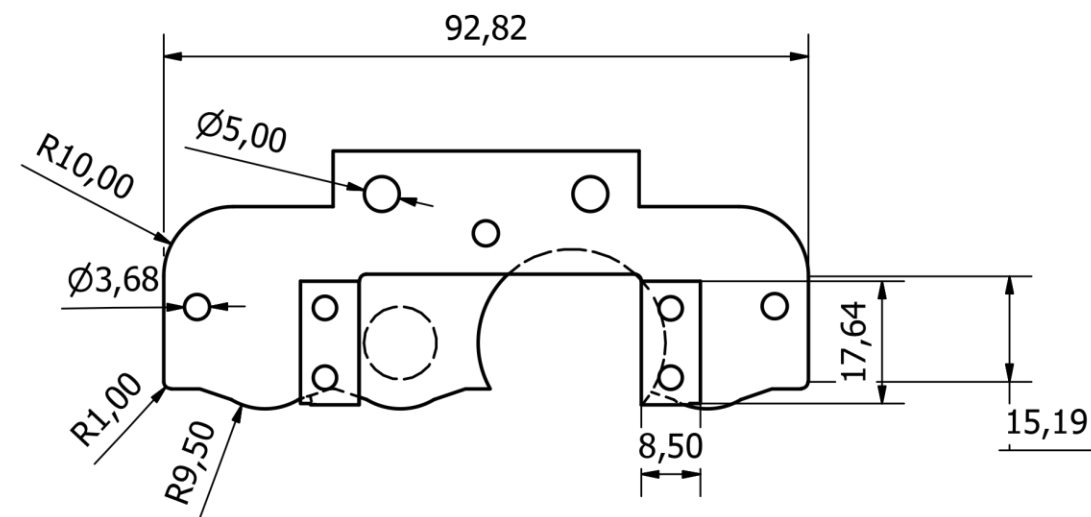
Diseñado por Julian Herrera Benavides	Revisado por Daniel Espitia Corredor	Director: David Herrera Alfonso	Fecha 10/01/2018	Plano N° 39
Departamento: Facultad de ingeniería mecatrónica		Proyecto: Robot Scara multifuncional		Escala 2:1
Nombre de la pieza: Arandela para rodamientos			Material: PLA	Unidades: mm



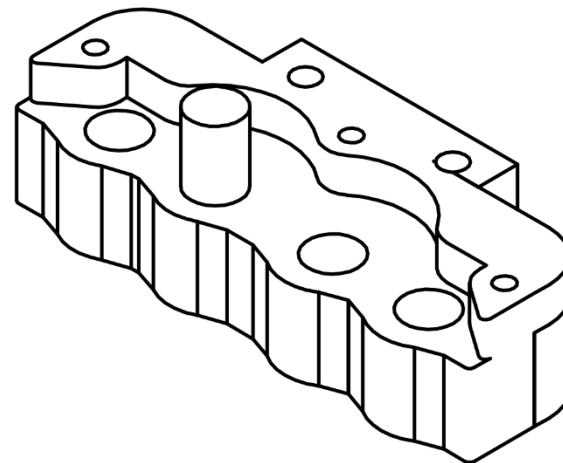
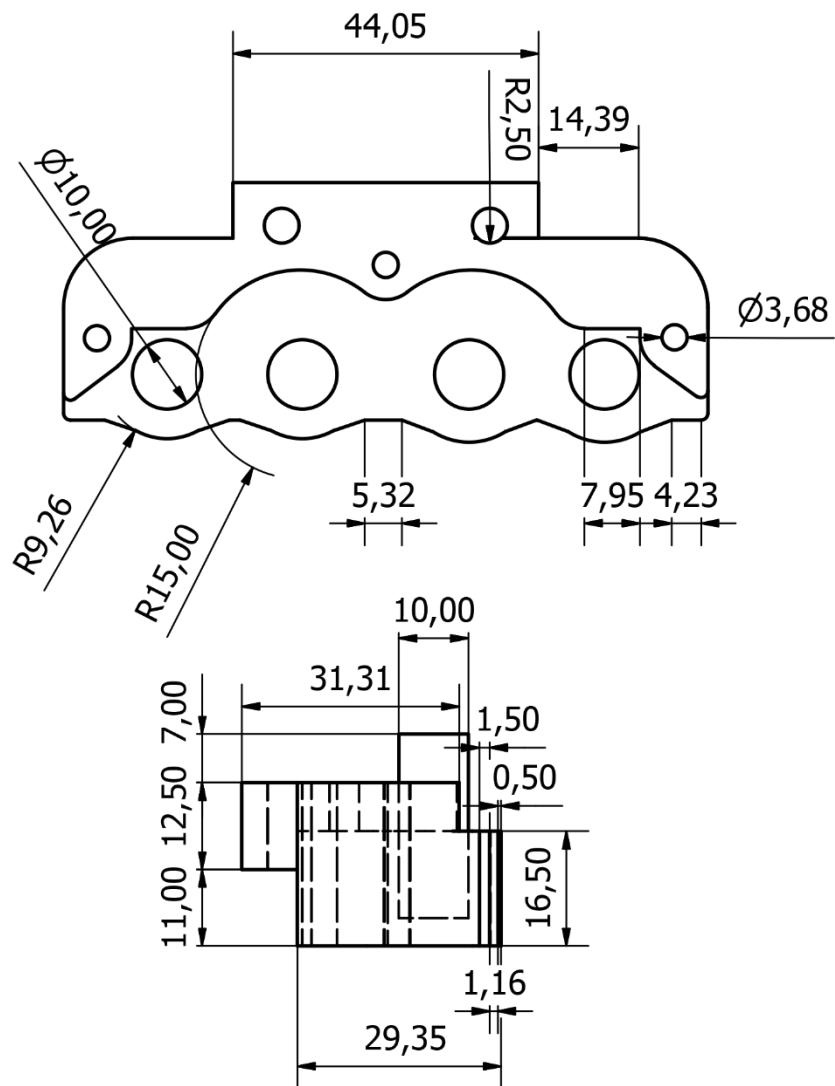
Diseñado por	Revisado por	Director:	Fecha	Plano N°
Julian Herrera Benavides	Daniel Espitia Corredor	David Herrera Alfonso	10/01/2018	40
	Departamento:	Proyecto:		Escala
	Facultad de ingeniería mecatrónica	Robot Scara multifuncional		2:1
Nombre de la pieza:			Material:	Unidades:
Unión temporal de la cubierta			MDF	mm



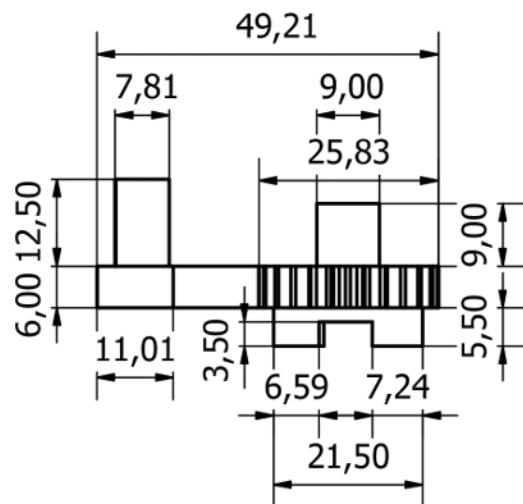
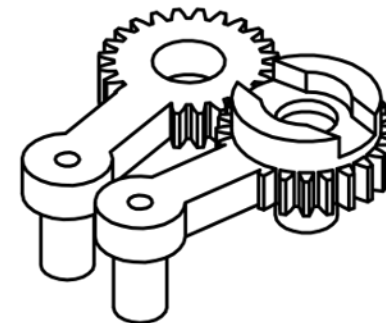
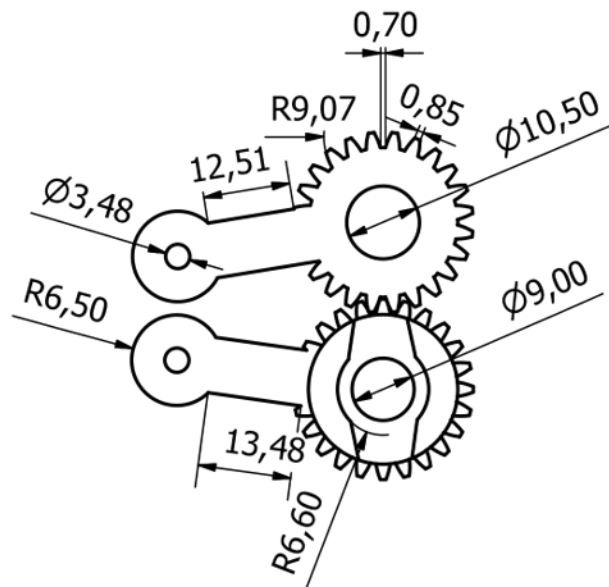
Diseñado por	Revisado por	Director:	Fecha	Plano N°
Julian Herrera Benavides	Daniel Espitia Corredor	David Herrera Alfonso	10/01/2018	41
	Departamento:	Proyecto:	Escala	
	Facultad de ingeniería mecatrónica	Robot Scara multifuncional	4:1	
Nombre de la pieza:			Material:	Unidades:
Unión temporal de la cubierta Lcd			MDF	mm



Diseñado por	Revisado por	Director:	Fecha	Plano N°
Julian Herrera Benavides	Daniel Espitia Corredor	David Herrera Alfonso	10/01/2018	42
Departamento:		Proyecto:	Escala	
Facultad de ingeniería mecatrónica		Robot Scara multifuncional	1:1	
Nombre de la pieza:			Material:	Unidades:
Carcasa del gripper			PLA	mm



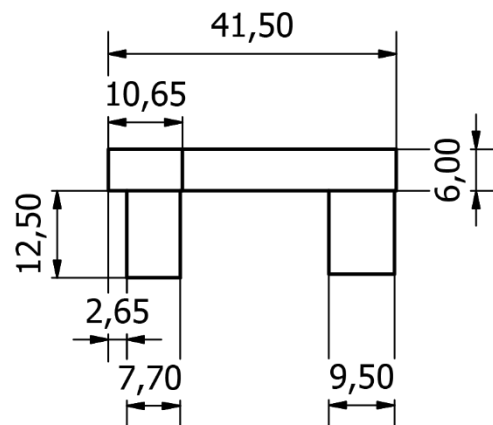
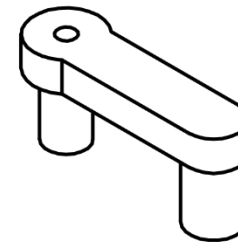
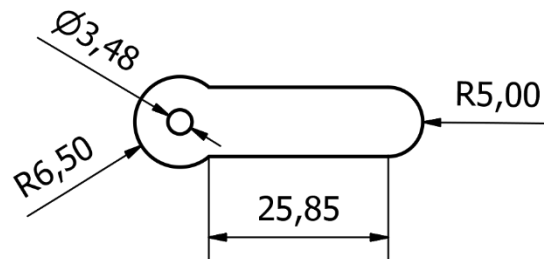
Diseñado por Julian Herrera Benavides	Revisado por Daniel Espitia Corredor	Director: David Herrera Alfonso	Fecha 10/01/2018	Plano N° 43
Departamento: Facultad de ingeniería mecatrónica		Proyecto: Robot Scara multifuncional		Escala 1:1
Nombre de la pieza: Base del gripper			Material: PLA	Unidades: mm



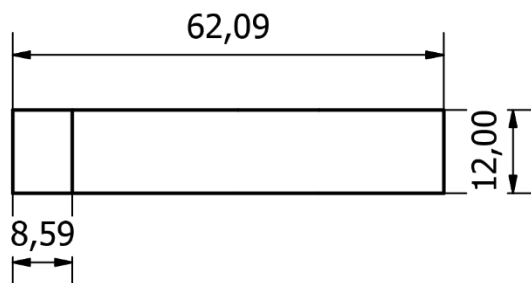
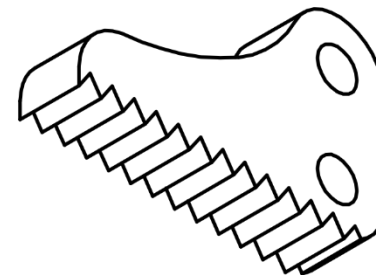
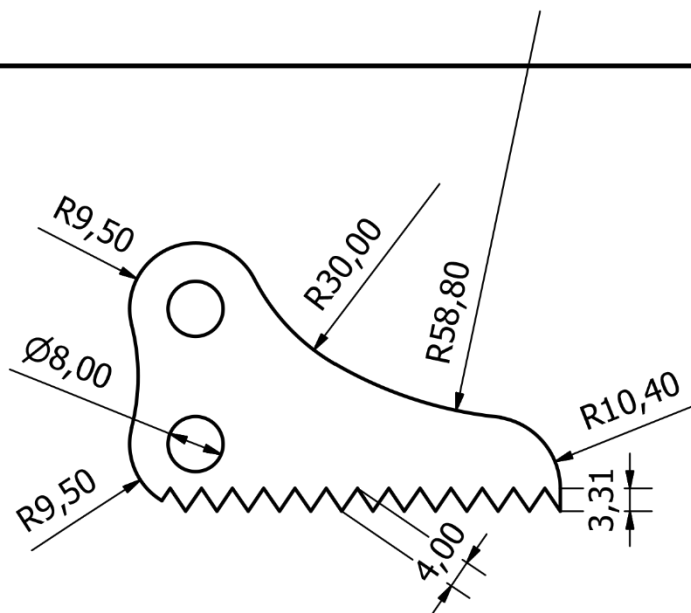
	Engranaje 1	Engranaje 2
Módulo	1	
Distancia entre centros	24 mm	
Ángulo de presión	20	
Razón del engranaje	1	
Número de dientes	16	16


Diseñado por Julian Herrera Benavides	Revisado por Daniel Espitia Corredor	Director: David Herrera Alfonso	Fecha 10/01/2018	Plano N° 44
Departamento: Facultad de ingeniería mecatrónica		Proyecto: Robot Scara multifuncional	Escala 1:1	
Nombre de la pieza: Engranes			Material: PLA	Unidades: mm

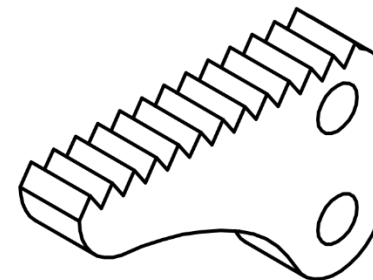
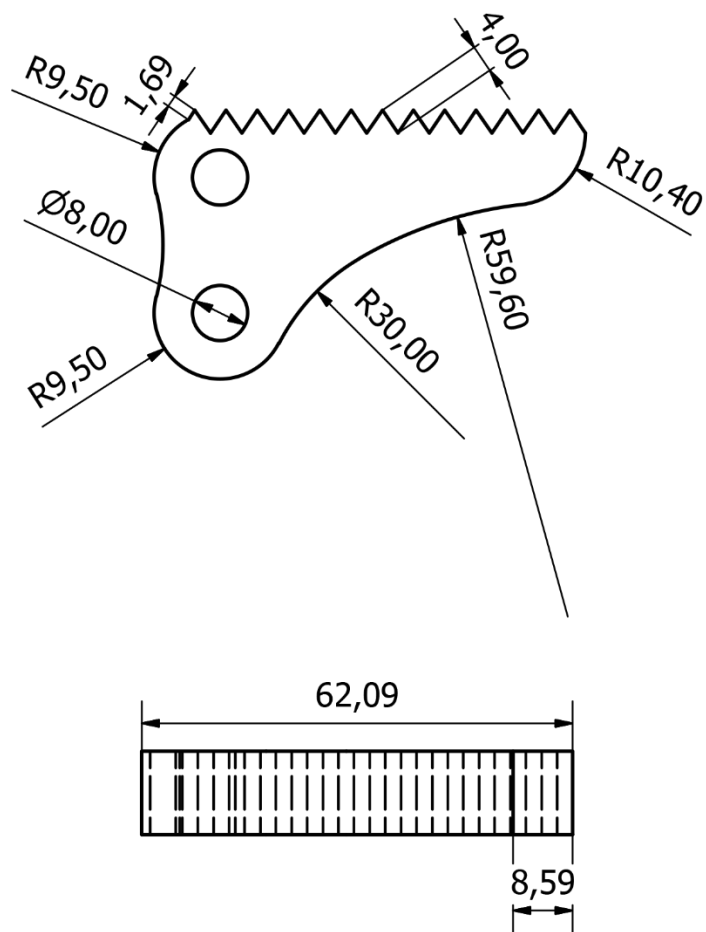




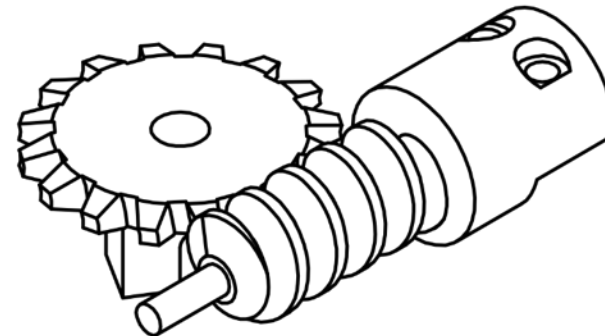
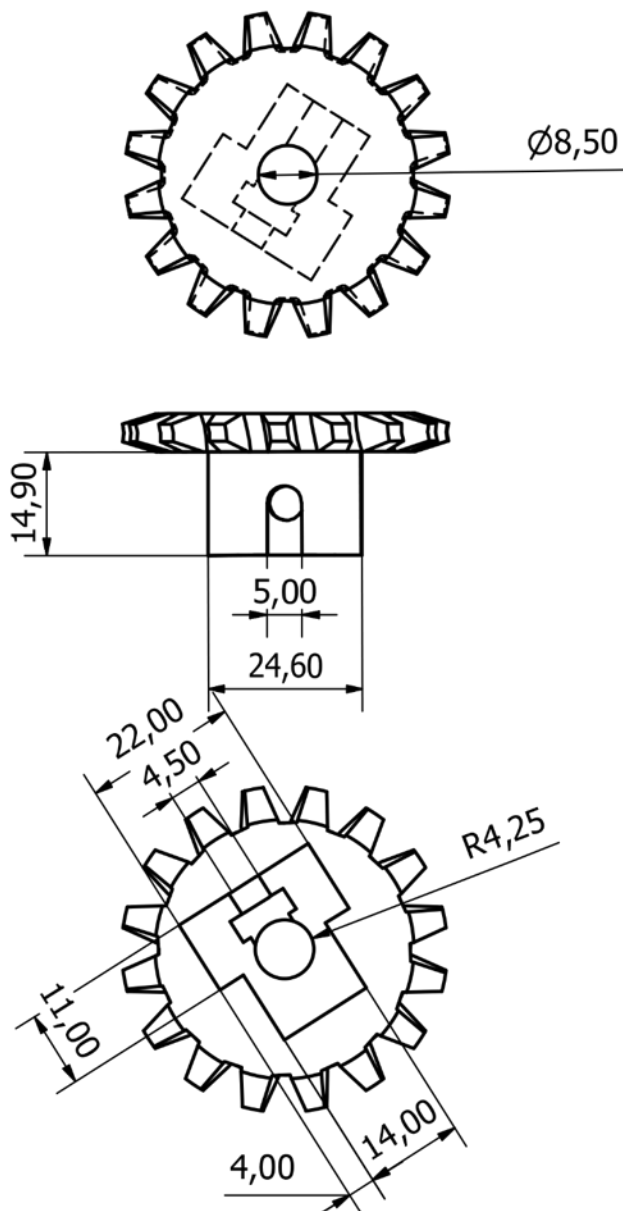
Diseñado por Julian Herrera Benavides	Revisado por Daniel Espitia Corredor	Director: David Herrera Alfonso	Fecha 10/01/2018	Plano N° 45
Departamento: Facultad de ingeniería mecatrónica		Proyecto: Robot Scara multifuncional		Escala 1:1
Nombre de la pieza: Conector del gripper			Material: PLA	Unidades: mm



Diseñado por	Revisado por	Director:	Fecha	Plano N°
Julian Herrera Benavides	Daniel Espitia Corredor	David Herrera Alfonso	10/01/2018	46
	Departamento:		Proyecto:	Escala
	Facultad de ingeniería mecatrónica		Robot Scara multifuncional	1:1
	Nombre de la pieza:		Material:	Unidades:
Pinza 1 del gripper		PLA	mm	



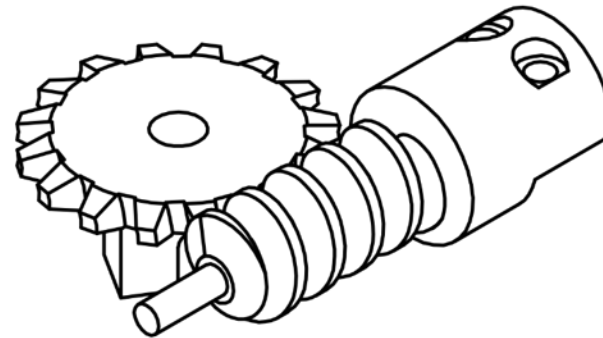
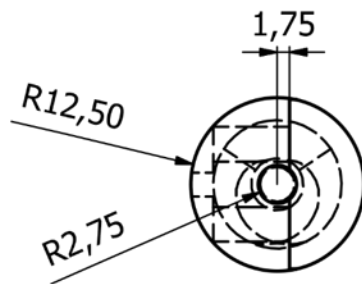
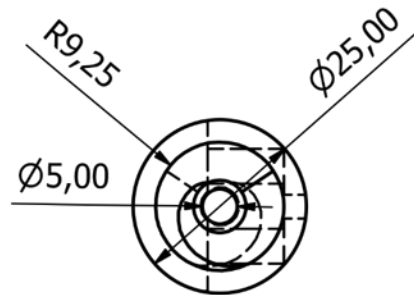
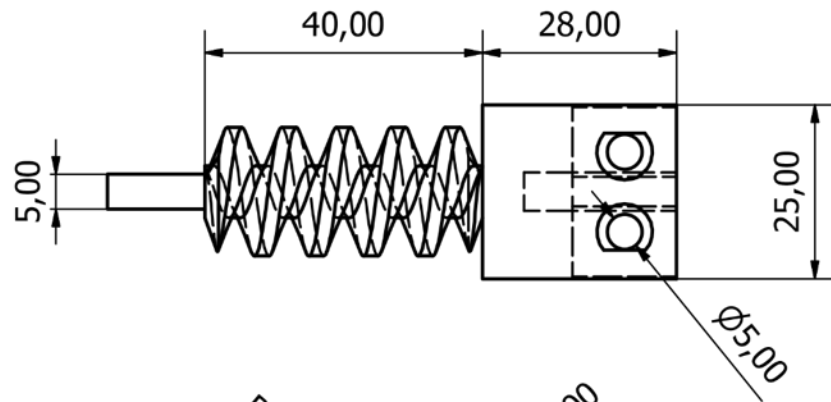
Diseñado por Julian Herrera Benavides	Revisado por Daniel Espitia Corredor	Director: David Herrera Alfonso	Fecha 10/01/2018	Plano N° 47
Departamento: Facultad de ingeniería mecatrónica		Proyecto: Robot Scara multifuncional		Escala 1:1
Nombre de la pieza: Pinza 2 del gripper			Material: PLA	Unidades: mm



Módulo	2.5
Distancia entre centros	27.5 mm
Ángulo de presión	20
Razón del engranaje	16
Número de dientes	16

Diseñado por Julian Herrera Benavides	Revisado por Daniel Espitia Corredor	Director: David Herrera Alfonso	Fecha 10/01/2018	Plano N° 48
Departamento: Facultad de ingeniería mecatrónica		Proyecto: Robot Scara multifuncional		Escala 1:1
Nombre de la pieza: Engranaje y gusano: Engranaje			Material: PLA	Unidades: mm





Módulo	2.5
Distancia entre centros	27.5 mm
Ángulo de presión	20
Ángulo de hélice	10.4915
Diámetro Pitch	13.5

Diseñado por Julian Herrera Benavides	Revisado por Daniel Espitia Corredor	Director: David Herrera Alfonso	Fecha 10/01/2018	Plano N° 49
Departamento: Facultad de ingeniería mecatrónica		Proyecto: Robot Scara multifuncional		Escala 1:1
Nombre de la pieza: Engranaje y gusano: Gusano			Material: PLA	Unidades: mm

